

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



ÚSTAV SOUDNÍHO INŽENÝRSTVÍ
INSTITUTE OF FORENSIC ENGINEERING

ANALÝZA RIZIK NAVRHOVÁNÍ STAVEB S OHLEDEM NA VYBRANÉ MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY

RISK ANALYSIS OF BUILDING DESIGN WITH REGARD TO THE SELECTED MATERIAL
CHARACTERISTICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. IVETA JIRÁSKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR MISÁK, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Iveta Jirásková

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Řízení rizik stavebních konstrukcí (3901T044)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Analýza rizik navrhování staveb s ohledem na vybrané materiálové charakteristiky

v anglickém jazyce:

Risk analysis of building design with regard to the selected material characteristics

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se bude zabývat ověřením fyzikálně mechanických a trvanlivostních charakteristik ztvrdlého betonu a jejich porovnáním se standardy pro navrhování betonových konstrukcí.

Cíle diplomové práce:

Diplomant provede řadu laboratorních analýz na konstrukčních betonech a vyhodnotí, zda výsledky zkoušek odpovídají požadavkům, které jsou uvedeny v Evropských normách pro navrhování konstrukcí. Dále diplomant provede statistické porovnání měřených charakteristik a zváží rizika spojená s proměnlivostí sledovaných veličin.

Seznam odborné literatury:

ČSN EN 1990 - Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí.

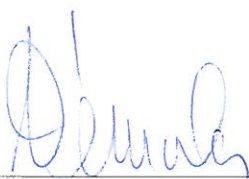
ČSN EN 12390-13 - Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku.

ČSN ISO 6784 - Beton. Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Misák, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 24. 10. 2014



doc. Ing. Aleš Vémola, Ph.D.
ředitel vysokoškolského ústavu

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá ověřením fyzikálně mechanických charakteristik ztvrdlého betonu, a to především pevností betonu v tlaku, statických i dynamických modulů pružnosti. Náplní práce je provedení řady laboratorních analýz na konstrukčních betonech a vyhodnocení, zda výsledky zkoušek odpovídají požadavkům, které jsou uvedeny v Evropských normách pro navrhování staveb. Dále práce zahrnuje vybrané techniky pro posuzování rizik (FMEA, Paretův diagram, Ishikawův diagram) a jejich aplikaci na vybraný proces – zkoušení betonu. Součástí práce je pak také statické porovnání měřených charakteristik a zvážení rizik spojená s proměnlivostí sledovaných veličin.

Abstract

This thesis focuses on the verification of physical and mechanical characteristics of hardened concrete, especially concrete compressive strength, static and dynamic modulus of elasticity. The job description is to perform a series of laboratory analyzes for structural concrete and evaluate the test results meet requirements that are specified in the European standards for designing buildings. The work also includes selected techniques for risk assessment (FMEA, Pareto diagram, Ishikawa diagram) and their application to selected process. Part of the work is also a static comparison of measured characteristics and consideration of the risks associated with variations in the monitored quantities.

Klíčová slova

Ztvrdlý beton, pevnost, modul pružnosti betonu, navrhování staveb, analýza, hodnocení, riziko.

Keywords

Hardened concrete, strength, modulus of elasticity of concrete, building design, analysis, assessment, risk.

Bibliografická citace

JIRÁSKOVÁ, I. *Analýza rizik navrhování staveb s ohledem na vybrané materiálové charakteristiky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2015. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Misák, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval/a samostatně a že jsem uvedl/a všechny použité informační zdroje.

V Brně dne

.....

podpis diplomanta

Poděkování

Ráda bych vyjádřila své poděkování vedoucímu diplomové práce Ing. Petrovi Misákovi Ph.D., za odborné vedení práce, poskytování rad a cenné připomínky, které mi pomohly při vypracování této diplomové práce.

OBSAH

1	ÚVOD	8
2	TEORETICKÁ ČÁST	9
2.1.	PEVNOST BETONU	9
2.2.1	Pevnost betonu v tlaku.....	9
2.2.2	Pevnost betonu dle ČSN EN 1992-1-1 [8]	11
2.2.	MODUL PRUŽNOSTI BETONU	11
2.1.1	Statické moduly betonu	12
2.1.2	Dynamické moduly pružnosti.....	15
2.1.3	Faktory ovlivňující modul pružnosti betonu	19
2.1.4	Pružné deformace dle ČSN EN 1992-1-1 [13].....	20
2.3.	RIZIKOVÉ INŽENÝRSTVÍ A MANAGEMENT RIZIKA.....	22
2.3.1	Základní pojmy.....	22
2.3.2	Posuzování rizik	24
2.3.3	Nástroje a techniky pro posuzování rizik	28
2.4	SPOLEHLIVOST STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ.....	30
2.4.1	Teorie spolehlivosti	30
2.4.2	Metody řešení spolehlivosti.....	33
2.4.3	Software FReET	35
3	METODIKA PRÁCE	37
3.1	NÁVRH SLOŽENÍ BETONU	38
3.2	VÝROBA A ZKOUŠENÍ BETONU	39
3.3	VYHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ.....	41
3.3.1	Výsledky zkoušek z měření pevnosti betonu v tlaku	41
3.3.2	Výsledky zkoušek z měření statického modulu pružnosti v tlaku	43

3.3.3	Výsledky zkoušek z měření dynamického modulu pružnosti UZ impulsivní metodou	45
3.3.4	Výsledky zkoušek z měření dynamického modulu pružnosti rezonanční metodou.....	47
3.3.5	Porovnání výsledků	49
3.4	APLIKACE VYBRANÝCH METOD	56
3.4.1	Analýza příčin a důsledků – Ishikawův diagram	56
3.4.2	Analýza důsledků a způsobů poruch – FMEA	56
3.4.3	Paretův diagram.....	59
4	ZÁVĚR	60
5	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	62
6	SEZNAMY	65

1 ÚVOD

Jisté riziko vzniku nepříznivých událostí existuje ve všech lidských činnostech. Riziko může mít podobu poškození majetku, finančních ztrát, environmentálních škod nebo zranění či úmrtí. Mezi nejčastější příklady rizikových událostí patří nejen doprava, průmysl chemický, strojírenský a nukleární, ale také stavební inženýrství. Statistiky uvádějí, že poruchy staveb jsou z 80% případů zaviněné lidskou chybou a zbývajících 20% poruch vznikají v důsledku náhodných vlastností vstupních veličin nezávislých na člověku (klimatické podmínky), a proto je analýza rizik ve stavebnictví velmi důležitá, zejména při navrhování staveb.

Vlivem následných změn, jako jsou vliv vývoje způsobu navrhování, vliv změn v technologiích betonu a výroby betonu, je třeba předvídat vlastnosti betonu, jako jsou smrštění, dotvarování, propustnost a modul pružnosti, který je nezbytným parametrem pro správné statické modelování betonových konstrukcí. V normě ČSN EN 1992-1-1 [8] je uveden výpočetní vztah vycházející z pevnosti betonu v tlaku, anebo se pro odvození statického modulu pružnosti betonu vychází ze směrných hodnot, které se vztahují ke konkrétní pevnostní třídě betonu. Vzhledem k heterogennímu charakteru struktury betonu, k nestejným vlastnostem použitých hmot i k nepřísilně přesné technologii výroby betonu, se jeho materiálové charakteristiky – pevnost v tlaku a modul pružnosti nevyjímá – mohou měnit. A proto je nezbytné zabývat se otázkou, zda při navrhování konstrukcí, kde velmi záleží na výsledném průhybu, je podstatné využívat pevnost betonu v tlaku pro odhad modulu pružnosti. Jelikož existuje velká variabilita hodnot statického modulu pružnosti v rámci jedné pevnostní třídy betonu, lze považovat směrné hodnoty pouze za informativní. Je totiž nutné počítat s tím, že výsledná reálná hodnota modulu pružnosti se může velmi lišit od směrných hodnot uváděných v normě [8] při dodržení pevnostní třídy betonu.

Cílem práce je provedení řady laboratorních analýz na konstrukčních betonech a vyhodnocení, zda výsledky zkoušek odpovídají požadavkům, které jsou uvedeny v Evropských normách pro navrhování staveb. Dále práce zahrnuje vybrané techniky pro posuzování rizik (FMEA, Paretův diagram, Ishikawův diagram) a jejich aplikaci na vybraný proces – zkoušení betonu. Součástí práce je pak také statické porovnání měřených charakteristik a zvažování rizik spojená s proměnlivostí sledovaných veličin.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1. PEVNOST BETONU

Pevnost je nejdůležitější mechanická vlastnost betonu a vyjadřuje odpor betonu proti změně jeho tvaru a proti jeho porušení působením vnějšího zatížení [1]. Hlavní funkcí betonu v konstrukci je přenášení silových účinků od zatížení. Pod jejich vlivem je beton vystavený různorodým namáhání. Pro ověření vlastností betonu se používají srovnávací hodnoty, které definují pevnost betonu [2]. Podle způsobu namáhání materiálu nejčastěji zjišťujeme:

- pevnost v prostém tlaku (krychelná, válcová, hranolová)
- pevnost v tlaku za ohybu
- pevnost v prostém tahu
- pevnost v tahu za ohybu, popř. pevnost v příčném tahu.

2.2.1 Pevnost betonu v tlaku

Pevnost betonu v tlaku f_c je pro hodnocení betonů nejvýznamnější charakteristickou vlastností. Zjišťuje se na tělesech získané z reálné konstrukce, nebo na zkušebních tělesech vyrobených v laboratoři ve stáří 28 dní. Zkušební vzorky mohou být buď krychle o hraně 150 mm, pak se jedná o pevnost v tlaku krychelnou $f_{c,cube}$ a nebo jsou vzorky válce o průměru 150 mm a výšce 300 mm, pak se jedná o pevnost v tlaku válcovou $f_{c,cyl}$ dle ČSN EN 12390-1 [3]. Na základě pevnosti betonu v tlaku se ztvrdlý beton dělí na pevnostní třídy, viz tabulka 1.

Výsledky naměřených pevností v tlaku vykazují určitý rozptyl. Proto rozlišujeme průměrnou pevnost f_{cm} (prostý průměr ze zjištěných hodnot) a charakteristickou pevnost f_{ck} . Charakteristická pevnost je hodnota, pro kterou platí, že s 95% pravděpodobností bude naměřená hodnota během zkoušky pevnosti f_{ci} vyšší než f_{ck} . Charakteristická pevnost je spolehlivější z hlediska navrhování konstrukcí a bývá ještě dle normovaných postupů upravována pomocí součinitele spolehlivosti na pevnost návrhovou f_{cd} [5].

Pevnost betonu v tlaku ovlivňuje řada činitelů. Jedním z činitelů, který ovlivňuje nárůst pevnosti betonu, jsou klimatické podmínky, tj. teplotní podmínky během výstavby. Při nízkých teplotách dochází ke zpomalení procesu hydratace cementu, a tím ke zpomalení nárůstu počáteční pevnosti betonu. Naopak při vyšších teplotách dochází ke zrychlení hydratace cementu a k nárůstu počáteční pevnosti betonu. Dalším činitelem jsou složky

betonu a to především poměr vody a cementu, tj. vodní součinitel. K nepříznivým vlivům na pevnost betonu také přispívá způsob ošetřování betonu a technologie zpracování (zhutňování).

Tabulka 1 Pevnostní třídy obyčejného a těžkého betonu v tlaku dle ČSN EN 206-1/Z3 [4]

Pevnostní třída betonu	Min. charakteristická válcová pevnost $f_{ck,cyl}$ (MPa)	Min. charakteristická krychelná pevnost $f_{ck,cube}$ (MPa)
C-/5	-	5
C-/7,5	-	7,5
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60
C 55/67*	55	67
C 60/75*	60	75
C 70/85*	70	85
C 90/95*	90	95
C 90/105*	90	105
C 100/115*	100	115

*Vysokopevnostní beton HSC

Stanovení pevnosti betonu v tlaku

Zkoušku pevnosti betonu v tlaku uvádí norma ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles [6]. Zkušební těleso, které musí vyhovovat požadavkům dle normy ČSN EN 12390-1 [7], je plynule zatěžováno lisem rychlostí $0,6 \pm 0,2$ N/mm²/s až do porušení tělesa. Poté se na zkušebním lisu odečítá maximální zatížení F . Pevnost v tlaku se stanoví poměrem maximálního zatížení při porušení F a plochy tělesa A_c , na kterou působí zatížení v tlaku [6]. Výsledek se zaokrouhlí s přesností na 0,1 N/mm². Pevnost v tlaku f_c v N/mm² je dána vztahem:

$$f_c = \frac{F}{A_c}. \quad (2-1)$$

2.2.2 Pevnost betonu dle ČSN EN 1992-1-1 [8]

Norma [13] v kapitole 3 materiály, uvádí k pevnosti betonu následující:

- Pevnost betonu v tlaku je klasifikována pomocí pevnostních tříd betonu v tlaku, které odpovídají charakteristické (5%) válcové pevnosti f_{ck} nebo krychelné $f_{ck,cube}$ podle EN 206-1.
- Pevnostní třídy v této normě vycházejí z charakteristické válcové pevnosti betonu f_{ck} stanovené ve stáří 28 dní, s největší hodnotou C_{max} .
- Charakteristické pevnosti f_{ck} a odpovídající mechanické vlastnosti nutné pro navrhování jsou uvedeny v tabulce 3.1.
- Pevnost betonu v tlaku ve stáří t závisí na druhu cementu, teplotě a podmínkách ošetřování. Pro průměrnou teplotu 20 °C a ošetřování podle EN 12390 lze pevnost betonu v tlaku v různých časech t stanovit ze vztahů:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm}, \quad (2-2)$$

kde

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}, \quad (2-3)$$

kde $f_{cm}(t)$ je průměrná hodnota pevnosti betonu v tlaku ve stáří t dní;

f_{cm} průměrná hodnota pevnosti betonu v tlaku ve stáří 28 dní podle tabulky 3.1. ;

$\beta_{cc}(t)$ součinitel závisící na stáří betonu t ;

t stáří betonu ve dnech;

s koeficient závisící na druhu cementu:

= 0,20 pro cement pevnostní třídy CEM 42,5 R, CEM 52,5 N a CEM 52,5 R
(třída R),

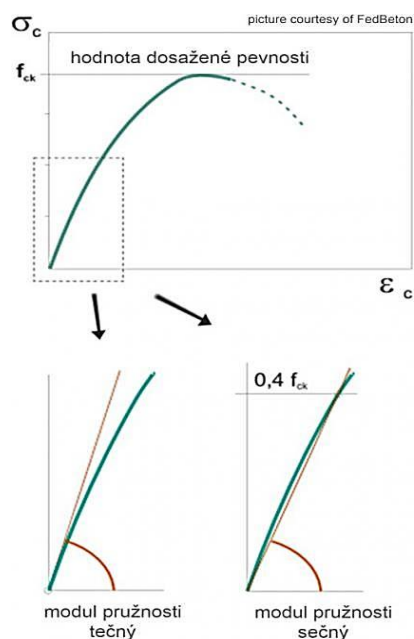
= 0,25 pro cement pevnostní třídy CEM 32,5 R, CEM 42,5 N (třída R),

= 0,38 pro cement pevnostní třídy CEM 32,5 N (třída S).

2.2. MODUL PRUŽNOSTI BETONU

Modul pružnosti betonu E vyjadřuje závislost mezi přetvořením ε a napětím σ (namáháním) ztvrdlého betonu. Na betonu s vyšším modulem pružnosti se při stejném zatížení projeví menší deformace.

Modul pružnosti se podle způsobu měření může dělit na modul statický a dynamický a podle zjištění z grafu (viz. Obrázek 1) závislosti napětí na přetvoření se dělí na sečnový a tečnový [9].



Obrázek 1 – Přetvoření (ε_c) jako funkce napětí (σ_c) v tlaku [10]

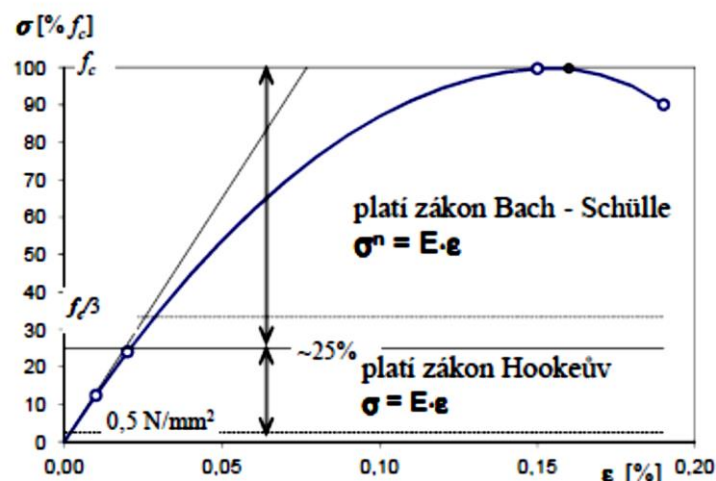
2.1.1 Statické moduly betonu

Statické moduly betonu jsou významné pružnostní charakteristiky vyjadřující deformační vlastnosti materiálu. Statické moduly pružnosti se zjišťují z deformací při známém zatížení a jsou ověřovány dvěma normovanými zkušebními postupy. První zkouškou je stanovení statického modulu pružnosti betonu v tlaku a druhou stanovení modulu pružnosti a přetvárnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem. V této diplomové práci bude podrobněji probrána zkouška stanovení statického modulu pružnosti betonu v tlaku [9].

Stanovení sečnového modulu pružnosti dle ČSN EN 12390 – 13 [11]

Statický (sečnový) modul pružnosti E je základní přetvárnostní charakteristikou betonu a jeden z hlavních parametrů z hlediska navrhování betonových konstrukcí. Určí se na základě Hookova zákona vyjadřující závislost mezi napětím σ a odpovídajícím přetvořením ε (viz Obrázek 2) ze vztahu [9]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon. \quad (2-4)$$

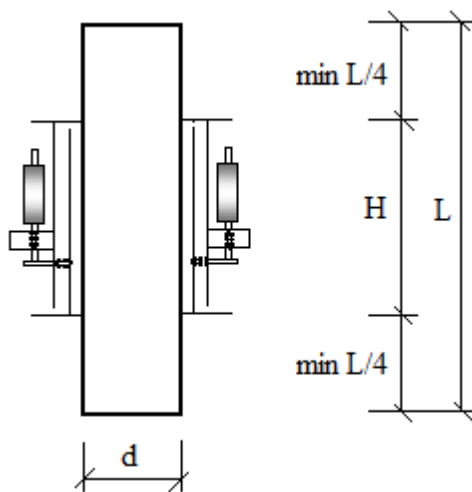


Obrázek 2 - Pracovní diagram betonu [13]

Postup měření a stanovení statického modulu pružnosti betonu v tlaku nalezneme v normě ČSN ISO 6784 [12] a nyní nově i v ČSN EN 12390-13 [11], která vyšla v únoru roku 2014. V nové normě [11] se určuje statický modul pružnosti podle dvou metod. Metoda A umožňuje stanovení počátečního a ustáleného sečnového modulu pružnosti, zatímco metoda B umožňuje stanovit ustálený sečnový modul pružnosti. Požadavky na zkušební zařízení jsou upřesněny podrobněji, než je tomu u normy [12], např. zkušební lis musí být schopen udržet zvolené konstantní zatížení s odchylkou max. 5 % a s možností nastavení automatického zatěžování. Základním zkušebním tělesem je válec 150 x 300 mm, ale použity mohou být také hranoly a tělesa získaná z jádrového vrtání. Štíhlost zkušebních těles, tedy poměr výšky L a příčného rozměru d , musí být v mezích 2 – 4 a d musí být větší než $3,5D_{max}$ (maximální zrno použitého kameniva). Délka měřicí základny l_o , na které je určována deformace tělesa při zatěžování, musí být větší než $2/3$ příčného rozměru d a menší než $1/2$ délky zkušebního tělesa L . Současně ale platí, že l_o musí být větší než $3D_{max}$. K zjištění předpokládané pevnosti betonu v tlaku f_c je vhodné použít srovnávací zkušební tělesa stejného tvaru a velikosti, ale je také možné pevnost f_c změřit na zkušebních tělesech, která se rozměrově či tvarově od zkušebních těles liší a tento fakt potom zohlednit. Horní napětí zatěžovacího cyklu σ_a je definována jako $1/3 f_c$. Zatěžovací cyklus je znázorněn na Obrázku 4. Rychlost zatěžování zkušebního tělesa je v intervalu $0,6 \pm 0,2$ MPa/s. Výsledná hodnota modulu pružnosti se potom zaokrouhluje na 100 MPa. Hodnota zjištěné pevnosti po zkoušce statického modulu pružnosti v tlaku by se neměla od předpokládané pevnosti betonu v tlaku f_c lišit o více než 20 %. U metody A je první kontrolou změna přetvoření. Pokud se hodnota ε_b

(poměrné přetvoření při působení dolní hladiny napětí) při třetím cyklu liší od hodnoty ε_b při druhém cyklu o více než 10 %, je nutné polohu zkušební tělesa upravit a zkoušku opakovat. Tato kontrola se u metody A provádí při předzatěžovacích cyklech a musí být provedena do 60 s. Druhou kontrolou je poté centrace zkušební tělesa. Jednotlivá přetvoření ε_b ve třetím zkušebním cyklu se nesmí lišit o více než 20 % od své průměrné hodnoty [14].

Je nutné během zkoušení kontrolovat centraci zkušební tělesa a ověřit také změnu průměrného přetvoření mezi druhým a třetím zatěžovacím cyklem. U metody B je pořadí kontrol naopak – nejdříve je potřeba ověřit podmínku vycentrování tělesa, kdy jednotlivá přetvoření ε_a (při horní hladině napětí) se během prvního cyklu nesmí od své průměrné hodnoty lišit o více než 20 %, a až potom přichází na řadu kontrola změny poměrného přetvoření, kdy změna ε_a mezi druhým a třetím cyklem nesmí překročit 10 %. O tom zda je zkouška platná, či naopak zda je potřeba zkoušku opakovat, se rozhodne až po jejím kompletním provedení. Norma [11] předepisuje, že při prvním zatěžovacím cyklu měřiče deformací musí být vynulovány, aby mohly být výše popsané podmínky ověřeny [14].



Obrázek 3 – Umístění měřícího zařízení na zkušební těleso [13]

Výpočet statického modulu pružnosti v tlaku dle vztahu z normy [11]:

$$E_{c,s} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_s} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_p^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{p,2}}, \quad (2-5)$$

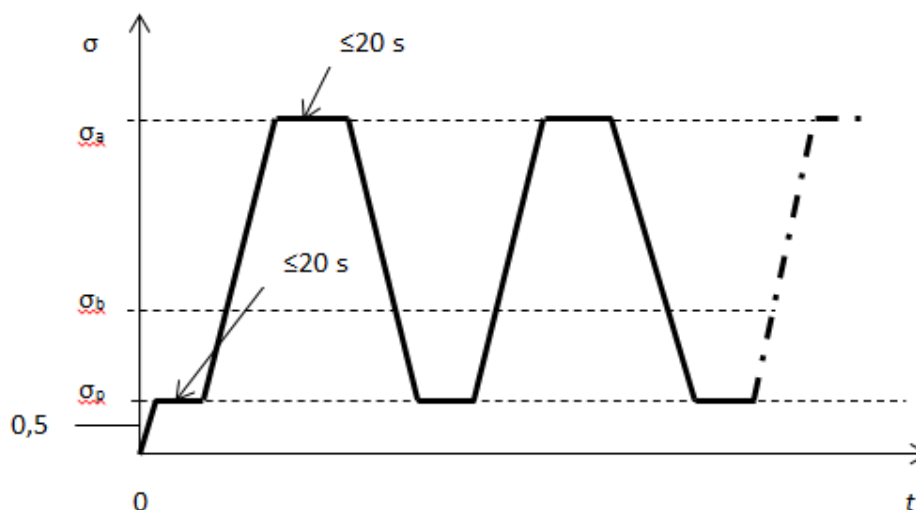
kde $E_{c,s}$ je statický modul pružnosti (MPa),

σ_a^m je hodní zatěžovací napětí $f_c/3$ (MPa),

σ_p^m je dolní zatěžovací napětí 0,5 MPa (MPa),

$\varepsilon_{a,3}$ je poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí (-),

$\varepsilon_{p,2}$ je poměrné přetvoření při základním napětí (-).



Obrázek 4 - Zatěžovací cyklus pro stanovení sečnového modulu pružnosti betonu v tlaku - Metoda B [11]

2.1.2 Dynamické moduly pružnosti

Dynamický modul pružnosti se zjišťuje při posuzování stávajících stavebních konstrukcí a zpravidla při zjišťování příčin jejich nadměrných průhybů. Měření dynamického modulu pružnosti je zkouškou nedestruktivní a popisuje ho norma ČSN 73 1371 [15].

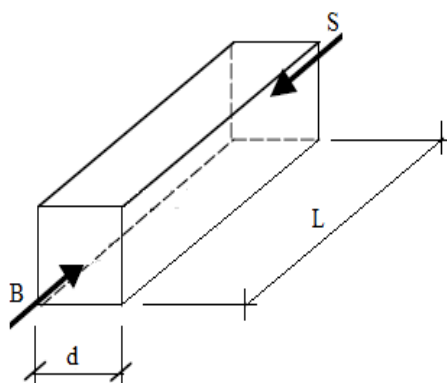
K zjištění dynamického modulu pružnosti betonu se využívá metoda ultrazvuková a rezonanční, které jsou popsány v již zmíněné normě ČSN 73 1371 [15].

Stanovení dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou (UZ) impulsivní metodou

Ultrazvuková impulsivní metoda spočívá v opakovaném vysílání UZ impulsů (o určeném kmitočtu) skrz zkoumaný materiál a zjištění doby průchodu UZ impulsu. Pokud je nám známá délka měřicí základny materiálu, lze velmi jednoduše vypočítat rychlost šíření ultrazvukového vlnění, která je závislá na kvalitě zkoumaného materiálu [16].

Ve stavebnictví se používá zkušební zařízení, které má UZ vlnění s frekvencí v rozmezí od 20 do 150 kHz, mimořádně do 500 kHz [16].

Nejprve se stanoví objemová hmotnost zkušební vzorku a poté probíhá vlastní měření doby průchodu UZ impulsu. Před tím, než se sondy s akustickým vazebným prostředkem přitlačí na značky měřících míst zkušební vzorku (viz Obrázek 5), je třeba provést eliminaci vzduchové mezery mezi sondou a zkušebním vzorkem a to určením tzv. ‚mrtvého času‘. Ten se určí na referenčním vzorku (nejpoužívanější je etanol), jehož časová charakteristika je známá. Tato kalibrace se provádí i během měření. Po přitlačení sondy na měřící místo zkušební vzorku, přístroj určí dobu průchodu impulsu v sekundách s přesností $\pm 1 \%$. Měření probíhá na každém měřícím místě dvakrát, a pokud se od sebe žádné z naměřených hodnot neliší o více než 5% od nejmenší naměřené hodnoty, tak výsledná hodnota se stanoví z aritmetického průměru naměřených hodnot. Jestliže se však nějaká hodnota liší o více než 5% od nejmenší hodnoty, uvažují se pouze hodnoty v této toleranci [17].



Obrázek 5 - Ukázka umístění sond na zkušební těleso. Označení B je budič a S je snímač.

Po provedení měření je dále potřeba určit rychlost šíření UZ impulsu V_L , která se určí ze vztahu [15]:

$$V_L = \frac{L}{t}, \quad (2-6)$$

kde V_L je rychlost šíření UZ impulsu (m/s),

L je délka měřící základny – zkušební vzorku (m),

t je naměřená doba průchodu UZ impulsu měřeným vzorkem, opravená o ‚mrtvý čas‘ (s).

Dále se určí hodnota koeficientu rozměrnosti prostředí k , který je závislý na hodnotě Poissonova poměru, a vypočítá se dynamický modul pružnosti betonu v tahu a tlaku E_{bu} :

$$E_{bu} = \rho \cdot V_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \cdot 10^{-6}, \quad (2-7)$$

kde E_{bu} je dynamický modul pružnosti betonu (N/mm²),

ρ je objemová pevnost materiálu (kg/m³),

V_L je rychlost šíření ultrazvuku (m/s),

K je koeficient rozměrnosti prostředí (-).

Stanovení dynamického modulu pružnosti betonu rezonanční metodou

Každý předmět z tuhého materiálu (tedy i beton) se po mechanickém impulsu rozkmitá. Jako rezonanci (vlastní kmitočet) označujeme jev vzrůstu amplitudy vynucených kmitů zkoušeného tělesa na maximum, ke kterému dochází v případě, kdy kmitočet vnější budící síly je shodný s vlastním (rezonančním) kmitočtem tělesa. Norma ČSN 73 1372 [17] popisuje postup zjišťování dynamického modulu betonu v tlaku i v tahu pomocí rezonanční metody, a je založena na vnášení kmitočtu do zkoušeného vzorku (viz Obrázek 6), který se rovná jeho vlastní frekvenci. Toto kmitání je možno docílit mnoha způsoby. K vyhodnocení dynamických materiálových charakteristik pravidelných těles se používají vlastní (rezonanční) frekvence podélného (f_L), příčného (f_t) a kroutivého (f_f) kmitání [18].

Aby se mohl provést výpočet dynamického modulu pružnosti, je také nutné stanovit rozměry a hmotnost zkušební vzorku. Z těchto naměřených dat se určí objemová hmotnost vzorku a poté se přistoupí k provedení samotné zkoušky. Vzhledem k obtížnému určení hodnot vlastních frekvencí neznámého vzorku materiálu je vhodné nejprve vypočítat přibližnou hodnotu vlastních frekvencí a poté v jejich okolí hledat skutečnou vlastní frekvenci měřením na rezonančním přístroji. Přibližnou hodnotu podélné frekvence f'_L v kHz určíme výpočtem z doby průchodu ultrazvukového vlnění vzorkem ve směru jeho délky dle vztahu [17]:

$$f'_L = \frac{500}{T}, \quad (2-8)$$

kde T je doba průchodu ultrazvuku ve směru “L”, (kHz),

f'_L je přibližná hodnota podélné frekvence (kHz).

Poté se zkušební těleso uloží na podložku z gumy nebo jiného materiálu, který netlumí kmitání vzorku, případně se zkušební vzorek podepře v místech předpokládaných uzlů kmitání,

kteře se při kmitání nepohybují. Ke zkušebnímu tělesu se přiloží sondy zkušebního přístroje v místech vhodných pro vznik kmitání a v místech předpokládaných maximálních amplitud kmitání. Po přiložení sond se těleso uvede do požadovaného kmitání postupnou změnou kmitočtu budícího oscilátoru (kladívka) v oblasti předpokládané rezonance a současně se na indikačním zařízení sleduje amplituda kmitání zkušebního tělesa. Maximální amplituda ukazuje, že vznikla rezonance, tj. shoda kmitočtu budícího oscilátoru s vlastním kmitočtem zkušebního tělesa, kmitajícím požadovaným způsobem (podélně, příčně, kroutivě) kmitání [17]. Frekvenční závislost se vyhodnocuje číselně metodou FFT (rychlá Fourierova transformace).

Z naměřených tří hodnot vlastní frekvence, podle způsobu podepření, vypočteme dynamický modul pružnosti v tlaku E_{br} (pro podélné podepření E_{brL} , pro příčné podepření E_{brf}) a modul pružnosti ve smyku G_{br} (kroutivé podepření) [17]:

$$E_{brL} = c_3^2 \cdot 4 \cdot L^4 \cdot f_L^2 \cdot \rho, \quad (2-9)$$

$$E_{brf} = 0,0789 \cdot c_1 \cdot L^4 \cdot f_f^2 \cdot \rho \cdot \frac{1}{i^2}, \quad (2-10)$$

$$G_{br} = 4 \cdot k \cdot L^2 \cdot f_t^2 \cdot \rho, \quad (2-11)$$

kde E_{brL} , E_{brf} jsou dynamické pružnosti betonu v tahu – tlaku (MPa),

G_{br} je dynamický modul pružnosti betonu ve smyku (MPa),

L je délka vzorku (m),

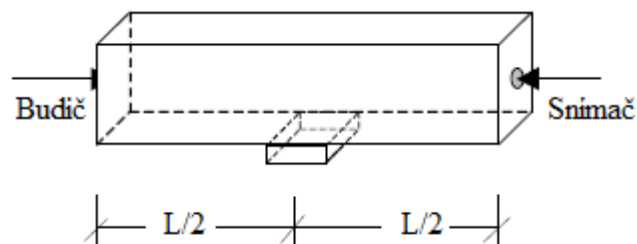
f_L , f_f , f_t jsou naměřené vlastní frekvence podélného, příčného a kroutivého kmitání (kHz),

ρ je objemová hmotnost betonu (kg/m³),

c_1 je korelační součinitel, zahrnující vliv smyku a setrvačnosti (-),

i je poloměr setrvačnosti příčného řezu vzorku k ose kolmé na rovinu kmitání (m),

k je součinitel závislý na tvaru průřezu vzorku (-).



Obrázek 6 – Příprava zkušebního tělesa pro rezonanční metodu [17]

2.1.3 Faktory ovlivňující modul pružnosti betonu

Modul pružnosti betonu je ovlivněn řadou činitelů (viz Obrázek 7), např. složením, zejména druhem a velikostí hrubého kameniva, ale také druhem a množstvím přísad a příměsí, či provzdušněním. Modul pružnosti betonu úzce souvisí s různými fyzikálně-mechanickými vlastnostmi betonu (dotvarování, smršťování, mrazuvzdornost) a jeho výsledná hodnota závisí na různých vlivech např., vliv teploty v počáteční fázi zrání betonu nebo vliv ošetřování. Výsledný modul pružnosti rovněž ovlivňují aspekty při zkoušení – velikost a tvar zkušebních těles, či obecně zvolený druh zkoušení. V podstatě lze základní faktory rozdělit do dvou skupin, a to na vlivy technologické a zkušební [19].

Technologické vlivy

Technologické vlivy lze rozdělit na tři základní aspekty:

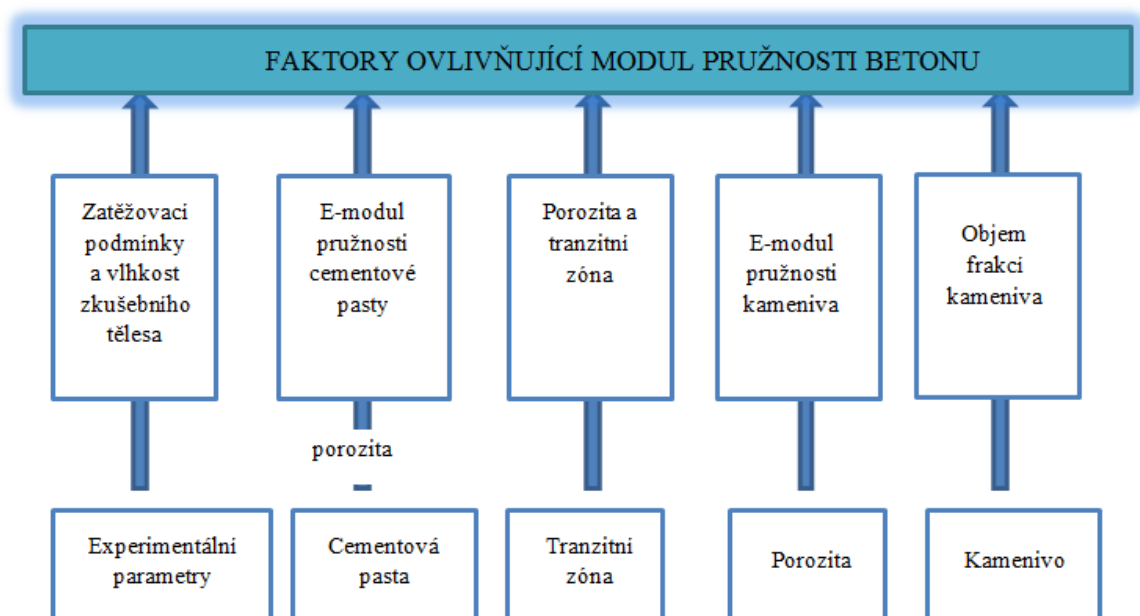
- složení betonové směsi (druh, velikost a množství kameniva; druh a množství cementu, přísad a příměsí; provzdušnění a vodní součinitel),
- technologie výroby a zpracování betonové směsi (míra zhutnění, teplota, vlhkost a doba ošetřování během tuhnutí a tvrdnutí),
- kvalita tranzitní zóny [19].

Zkušební vlivy

Postupy pro provádění a vyhodnocení zkoušek jsou uvedeny v příslušných normách, kde jsou definovány okrajové podmínky zkoušek. Přesto mohou zkušební vlivy výrazně ovlivnit výslednou hodnotu modulu pružnosti betonu. Zkušební vlivy mohou být následující [12]:

- použitá zkušební metoda (statický nebo dynamický modul pružnosti betonu),
- použitý výpočetní vztah, zatěžovací úroveň,
- tvar a velikost zkušebního tělesa (poměr h/d , směr zhutnění a zatěžování),
- způsob získání zkušebního tělesa (reálná konstrukce, zhotovení v laboratoři),

- stáří zkušebního tělesa,
- prostředí v laboratoři během zkoušky,
- typ použitého snímače (přesnost, konstrukce snímače),
- vliv zkušebního lisu,
- Excentricita uložení zkušebního tělesa a excentricita zkušební síly,
- rychlost a typ zatěžování,
- způsob koncování tělesa,
- kvalita použitých forem pro tělesa vyrobená v laboratoři.



Obrázek 7 - Faktory ovlivňující modul pružnosti betonu [20]

2.1.4 Pružné deformace dle ČSN EN 1992-1-1 [13]

Hodnota statického modulu pružnosti do jisté míry závisí na definici normy ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby [13].

Norma [13] v kapitole 3 Materiály, uvádí k modulu pružnosti následující:

- Pružné deformace betonu velkou měrou závisí na jeho složení (zejména na kamenivu). Hodnoty uvedené v této normě se mají považovat za směrné pro obecné použití. Avšak

pokud je konstrukce citlivá na odchylky od těchto obecných hodnot, mají se tyto hodnoty stanovit přesněji.

- Modul pružnosti betonu závisí na modulu pružnosti jeho složek. Přibližné hodnoty modulu pružnosti E_{cm} (sečnová hodnota mezi $\sigma_c = 0$ a $0,4 f_{cm}$) pro betony se silikátovým kamenivem jsou definované vztahem:

$$E_{cm} = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3}, \quad (2-12)$$

kde E_{cm} je sečnový modul pružnosti v N/mm^2 a f_{cm} charakteristická válcová pevnost v tlaku v N/mm^2 odvozená z pevnosti betonu $f_{ck, cube}$ a za použití vzorce:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8. \quad (2-13)$$

Pro vápencové a pískovcové kamenivo se mají hodnoty snížit o 10 %, resp. 30 %. Pro čedičové kamenivo se mají hodnoty zvýšit o 20 %.

- Změny modulu pružnosti v čase mohou být určeny ze vztahu:

$$E_{cm}(t) = (f_{cm}(t)/f_{cm})^{0,3} E_{cm}, \quad (2-14)$$

kde $E_{cm}(t)$ a $f_{cm}(t)$ jsou hodnoty ve stáří t dní a E_{cm} a f_{cm} jsou hodnoty stanovené ve stáří 28 dní.

- Poissonův součinitel lze uvažovat hodnotou 0,2 pro beton neporušený trhlinami a hodnotou 0 pro beton s trhlinami.
- Pokud nejsou k dispozici přesnější údaje, lze uvažovat hodnotu součinitele teplotní délkové roztažnosti rovnou $10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

V Tabulce 2 jsou uvedeny pevnostní a deformační charakteristiky betonu podle normy ČSN EN 1992-1-1 [8].

Tabulka 2- Pevnostní a deformační charakteristiky betonu dle ČSN EN 1992-1-1 [8]

Pevnostní třída betonu	Charakteristická válcová pevnost f_{ck}^* (MPa)	Charakteristická krychelná pevnost $f_{ck,cube}^*$ (MPa)	Střední hodnota pevnosti v tlaku f_{cm}^* (MPa)	Modul pružnosti E_{cm}^* (GPa)
C 12/15	12	15	20	27
C 16/20	16	20	24	29
C 20/25	20	25	28	30
C 25/30	25	30	33	31
C 30/37	30	37	38	33
C 35/45	35	45	43	34
C 40/50	40	50	48	35
C 45/55	45	55	53	36
C 50/60	50	60	58	37
C 55/67	55	67	63	38
C 60/75	60	75	68	39
C 70/85	70	85	78	41
C 80/95	80	95	88	42
C 90/105	90	105	98	44

2.3. RIZIKOVÉ INŽENÝRSTVÍ A MANAGEMENT RIZIKA

2.3.1 Základní pojmy

Rizikové inženýrství je teoreticko-aplikační obor, který tvůrčím a komplexním způsobem přistupuje k rizikům, nezávisle na oborech a situacích, v nichž vznikají [21]. Rizikové inženýrství se zabývá technickými stránkami problémů rizik a jejich hodnocením. Převládají v něm prvky technické, matematické modelování, pravděpodobnostní analýzy, finitní matematika a jiné převážně exaktní vědní disciplíny [22]. Na Obrázku 8 je znázorněna přehledná struktura inženýrství rizik.

Management rizik je jednou z disciplín obecného projektového managementu, jehož cílem je zajistit dodržení rozpočtu a lhůty projektu pro vedení a řízení organizace s ohledem na rizika [21]. Dominují mu ekonomické přístupy k problémům vystaveným nejistotám nebo neurčitostem [22].

Riziko je v rámci metodiky řízení rizik definováno jako souběh pravděpodobnosti vzniku nějakého nežádoucího jevu a jeho důsledku pro toho, kdo je nositelem rizika. Matematicky lze tento vztah popsat rovnicí [23]:

$$R = P \cdot D, \quad (2-15)$$

kde R je riziko,

P – pravděpodobnost, že nastane nežádoucí jev,

D – důsledek uskutečnění nežádoucího jevu, zpravidla ve finančním vyjádření.

Nežádoucí jev (událost) při výstavbě inženýrského díla je vznik stavu, který má pro některého z účastníků výstavby nežádoucí důsledky. Vznik některých nežádoucích jevů lze přijetím vhodných opatření v projektu či v organizaci výstavby předem zcela vyloučit a u jiných lze za určitých okolností téměř s jistotou předpokládat, že nastanou. Většina možných nežádoucích jevů však může nastat s větší či menší pravděpodobností [23].

Pokud nežádoucí jev ve skutečnosti nastane, přestože to nebylo předpokládáno, má pro stavebníka nebo i další účastníky výstavby vždy velmi nepříznivé důsledky. Ty lze v konečném hodnocení zpravidla vyjádřit jako újmu nebo finančně jako škodu [23].

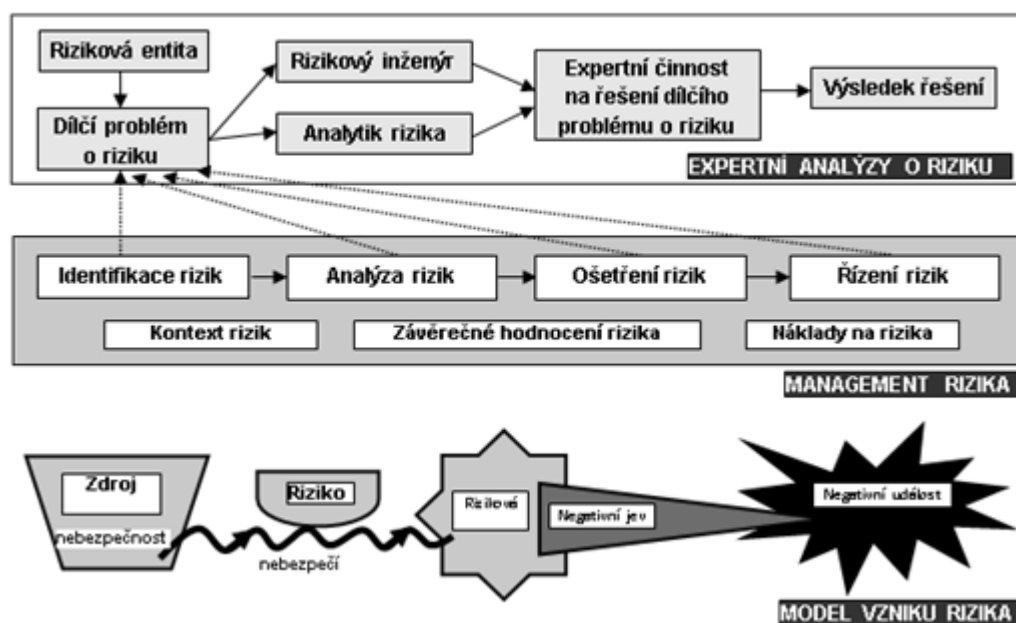
Pravděpodobnost vzniku nežádoucího jevu je možno vyjádřit dvěma způsoby [23]:

- Kvalitativně – na základě expertního posouzení,
- Kvantitativně – pomocí pravděpodobnostních metod.

Důsledky vzniku nežádoucího jevu se vyjadřují finanční částkou, kterou se ocení vzniklé škody nebo náklady nutné na odstranění následků nežádoucího jevu.

Riziko neznamena jen nebezpečí velké havárie, ztráty života či katastrofy. V inženýrských stavbách může jít například i o sesuvné pohyby způsobené stavebními pracemi, větší přítoky vody do stavební jámy, nekvalitní subdodávky služeb či materiálu, drobné chyby v projektu či nepříznivé vlivy lidského činitele. V průběhu výstavby mohou nastat desítky takových jevů [23].

STRUKTURA INŽENÝRSTVÍ RIZIK

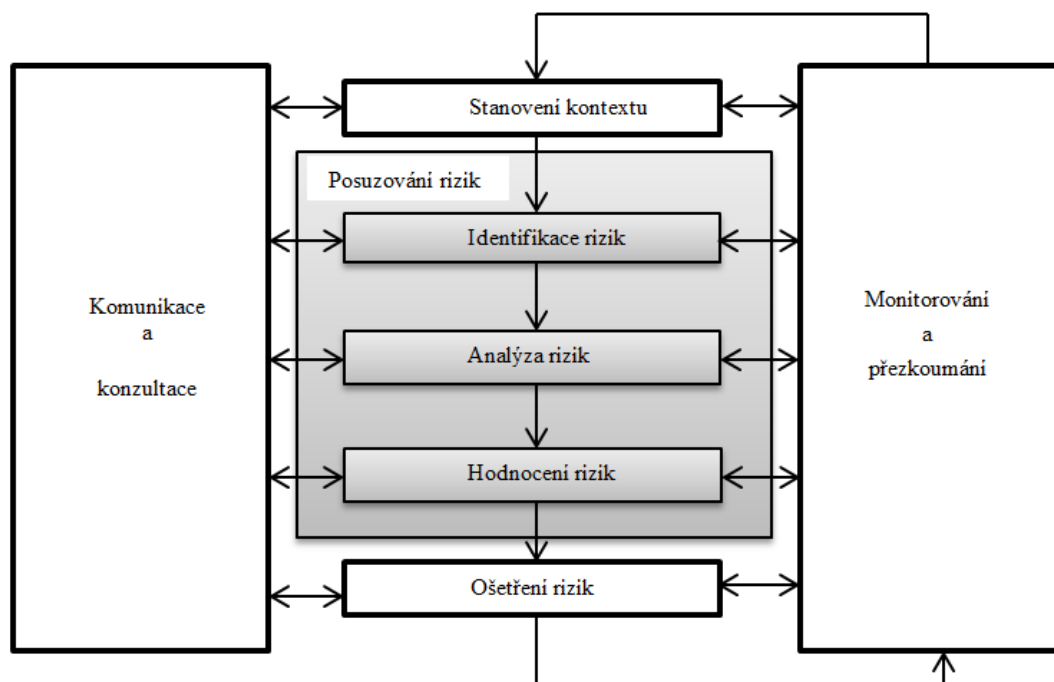


Obrázek 8 - Struktura inženýrství rizik [21]

2.3.2 Posuzování rizik

Posuzování rizik umožňuje pracovníkům činicí rozhodnutí a odpovědným stranám lépe chápat rizika, která by mohla ovlivnit dosažení cílů i přiměřenost a efektivnost prvků řízení rizika, které jsou již použity [24].

Posuzování rizik je celkovým procesem skládajícím se z identifikace rizik, analýzy rizik a hodnocení rizik (viz Obrázek 9). Způsob, jakým je tento proces použit, nezávisí pouze na kontextu procesu managementu rizik, ale také na metodách a technikách použitých při provádění posuzování rizik [24].



Obrázek 9 - Příspěvek posuzování rizik k procesu managementu rizik [24]

Identifikace rizik

Účelem identifikace rizik je zjistit, co by se mohlo stát nebo jaké by mohli nastat situace, které by mohli ovlivnit dosažení cílů systému nebo organizace. Jakmile je riziko identifikováno, má organizace identifikovat jakékoli existující prvky řízení rizika, jako jsou např. vlastnosti návrhu, lidé, procesy a systémy [24].

Proces identifikace rizik zahrnuje zjištění příčin a zdroje rizika (nebezpečí v kontextu fyzické újmy), událostí, situací a okolností, které by mohli mít materiální dopad na cíle, a povahu tohoto dopadu [24].

K metodám identifikace rizik mohou patřit:

- metody založené na důkazu, k jejichž příkladům patří kontrolní seznamy a přezkoumání historických dat;
- systematické týmové přístupy, při nichž se tým expertů řídí systematickým procesem s cílem identifikovat rizika pomocí strukturovaného souboru výzev nebo otázek;
- techniky induktivního uvažování, jako je např. HAZOP [24].

Aby se zlepšila přesnost a úplnost identifikace rizik, mohou být použity různé podpůrné techniky včetně brainstormingu a metodiky Delphi [24].

Bez ohledu na to, jaké techniky se ve skutečnosti použijí, je důležité, aby při identifikaci rizika byly náležitě rozpoznány lidské a organizační faktory. A proto odchylky lidských a organizačních faktorů od očekávaných mají být zahrnuty do procesu identifikace rizik stejně jako „hardwarové“ a „softwarové“ události [24].

Analýza rizik

Analýza rizik se týká rozvíjení a chápání rizika. Poskytuje vstup do posuzování rizik a k rozhodnutím o tom, zda je třeba rizika ošetřit, a o tom, které strategie metody ošetření jsou nejvhodnější [24].

Do analýzy rizik je zahrnuto zohlednění příčin a zdrojů rizika, jejich následků a pravděpodobnosti, že se tyto následky mohou vyskytnout. Mají se identifikovat faktory, které ovlivňují následky a pravděpodobnost. Událost může mít četné následky a může ovlivnit četné cíle. Mají se vzít v úvahu existující prvky řízení rizika a jejich efektivnosti [24].

Metody použité při analyzování rizik mohou být kvalitativní, semikvantitativní nebo kvantitativní. Stupeň požadovaných podrobností bude záviset na určité aplikaci, dostupnosti spolehlivých dat a potřeb rozhodování organizace. Některé metody a stupeň podrobností analýzy mohou být předepsány legislativou [24].

Pomocí *kvalitativního* posuzování je stanoven následek, pravděpodobnost a úroveň rizika pomocí úrovně důležitosti, jako je „vysoká“, „střední“ a „nízká“ úroveň, může se při něm kombinovat následek a pravděpodobnost a lze hodnotit výslednou úroveň rizika ve vztahu ke kvalitativním kritériím [24].

Při *semikvantitativních* metodách se pro následek a pravděpodobnost používají numerické klasifikační stupnice a kombinují se s cílem stanovit úroveň rizika s použitím vzorce. Stupnice mohou být lineární nebo logaritmické, nebo mohou vyjadřovat jiný vztah; použité vzorce se také mohou různit [24].

Při *kvantitativních* analýzách jsou odhadnuty praktické hodnoty pro následky a jejich pravděpodobnosti a stanoví se hodnoty úrovně rizika ve specifických jednotkách stanovených v průběhu vypracování kontextu. Plně kvantitativní analýza nemusí být vždy možná nebo žádoucí v důsledku nedostatečných informací o systému nebo analyzované činnosti, nedostatku dat, vlivu lidských faktorů atd., nebo když není úsilí o kvantitativní analýzu zaručeno nebo požadováno. Za takových okolností může být stále efektivní srovnávací

semikvantitativní nebo kvalitativní klasifikace rizik učiněná odborníky zběhlými v příslušném oboru [24].

Hodnocení rizik

Do hodnocení rizik je zahrnuto srovnání odhadovaných úrovní rizika s kritérii stanovenými při stanovení kontextu s cílem určit význam úrovně a typu rizika [24].

Při hodnocení rizik se využívá pochopení rizika získaného během analýzy rizik za účelem rozhodnutí o budoucích zásazích. Jako vstupy pro tato rozhodnutí slouží etické, právní, finanční a jiné záležitosti včetně vnímání rizika [24].

K rozhodnutím mohou vést následující aspekty:

- zdali riziko potřebuje ošetření;
- priority pro ošetření;
- zdali má být podniknuta nějaká činnost;
- kterou z řady cest je nutné se řídit.

O povaze rozhodnutí, která musí být učiněna, a o kritériích, která budou použita k rozhodování, se rozhodlo při stanovení kontextu, ale je nutné je podrobněji revidovat v etapě, kde se ví víc o určitých identifikovaných rizicích [24].

Nejjednodušším rámcem pro stanovení kritérií rizika je jediná úroveň, na které jsou rizika stanovena na ta, která potřebují ošetření, a na ta, která jej nepotřebují. Toto poskytuje lákavě jednoduché výsledky, ale neodráží nejistoty zahrnuté jednak do odhadování rizik, jednak do stanovení hranice mezi těmi, která potřebují ošetření, a těmi, která je nepotřebují [24].

Rozhodnutí o tom, zda a jak ošetřit riziko, může záviset na nákladech a přínosech při podstupování rizika, a na nákladech a přínosech při zavedení zlepšených prvků řízení rizika [24].

Běžný přístup spočívá v rozdělení rizika na tři skupiny:

- a) horní skupina, kde je úroveň rizika považovaná za nepřijatelnou bez ohledu na to, zda činnost může znamenat jakýkoli přínos, a ošetření rizika je nezbytné za jakoukoli cenu;

- b) střední skupina (neboli „šedá“ oblast), kde se berou v úvahu náklady i přínosy, a příležitosti jsou zvažovány vzhledem k potenciálním následkům;
- c) dolní skupina, kde je úroveň rizika považována za zanedbatelnou nebo tak malou, že nejsou potřebná žádná opatření k ošetření rizika [24].

Tímto přístupem se řídí systém kritérií „tak nízké (riziko), jak je rozumně možné“ neboli ALARP (*as low as reasonably practicable*) používaný v bezpečnostních aplikacích, kde je ve střední skupině pohyblivá stupnice pro nízká rizika, u kterých náklady a přínosy mohou být přímo srovnány, zatímco u vysokých rizik je nutné možnost poškození snížit, dokud nebudou výdaje na další snížení naprosto neúměrné získanému bezpečnostnímu přínosu [24].

2.3.3 Nástroje a techniky pro posuzování rizik

Kapitola stručně pojednává o nejpoužívanějších technikách analýzy systému pro posuzování rizik. Všechny metody pro analýzu rizik jsou uvedené v normě ČSN EN 31010 [24]. Níže je uvedeno několik vybraných technik.

Analýza způsobů a důsledků poruch (FMEA – Failure Modes and Effects Analysis) a analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch (FMECA – Failure Modes and Effects and Criticality Analysis)

Jedná se o analytickou techniku, jejímž cílem je identifikovat místa možného vzniku poruch nebo vad v systémech. Metoda FMEA kombinuje verbální a numerický odhad závažnosti rizik. Verbální část identifikuje možné riziko (vznik, způsob a následek poruchy). V numerické části se provede součin tří hodnot, jejichž výsledkem je číslo priority rizika RPN (Risk Priority Number). Tyto tři hodnoty představují:

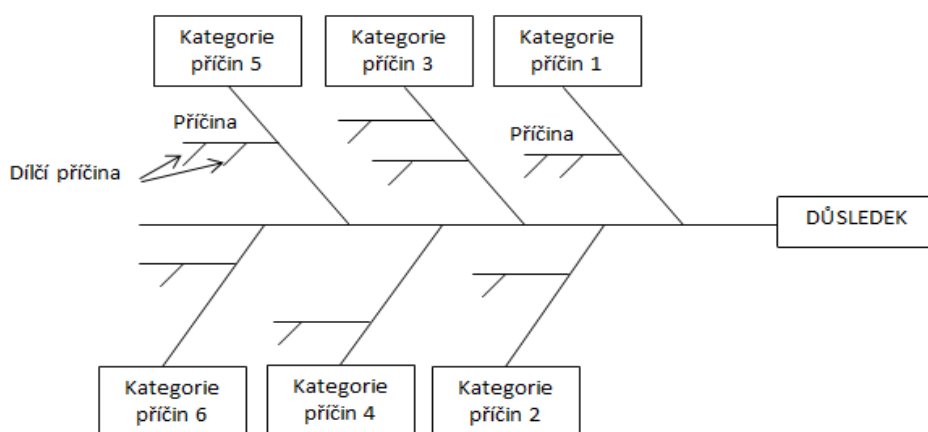
- pravděpodobnost výskytu rizika,
- závažnost rizika,
- zjistitelnost rizika.

Jakmile jsou zjištěny způsoby a mechanismy poruch, stanoví se nápravná opatření s cílem eliminovat jisté riziko.

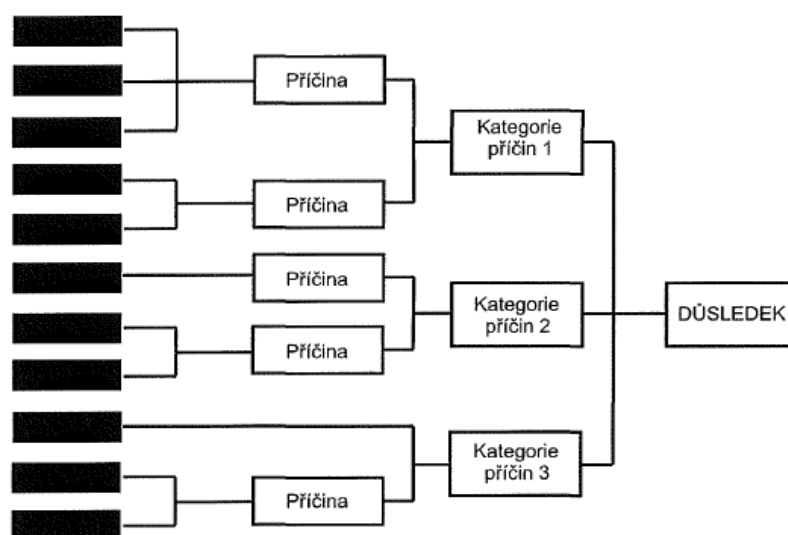
Analýza FMECA rozšiřuje analýzu FMEA o klasifikaci podle důležitosti a kritičnosti každý identifikovaný způsob poruchy. Tato analýza je obvykle kvalitativní nebo semikvantitativní, ale může být kvantifikována při použití skutečných intenzit poruch [24].

Analýza příčin a důsledků (Cause-and-effect analysis)

Tato metoda slouží k identifikaci možných příčin nežádoucí události nebo problému. Výstupem analýzy je strukturované zobrazení seznamu příčin dopadu formou diagramu typu rybí kost neboli Ishikawův diagram (Obrázek 10), nebo diagram v podobě stromu (Obrázek 11) [24].



Obrázek 10 - Příklad Ishikawova diagramu typu rybí kost [24]

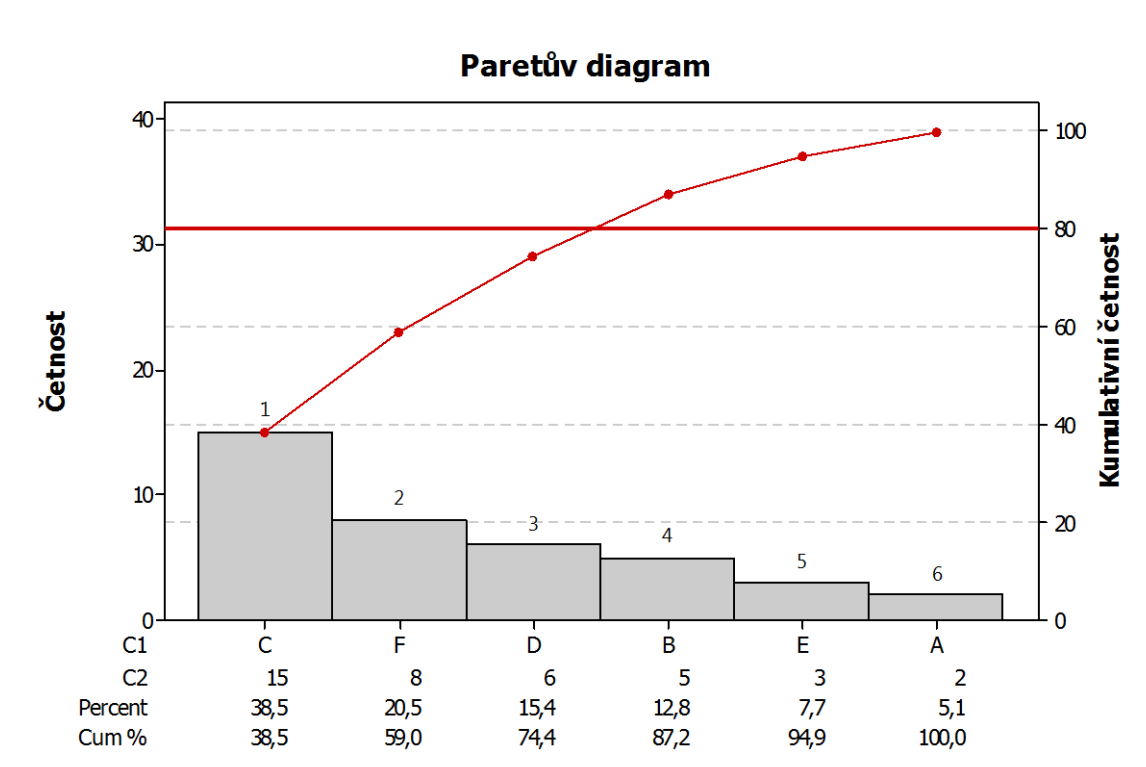


Obrázek 11 - Příklad formulace stromu analýzy příčin a důsledků [24]

Danými kategoriemi mohou být lidé, zařízení, prostředí, procesy atd. Analýzu je vhodné aplikovat na určité oblasti rizika tj. kvalita, bezpečnost nebo environment.

Paretův diagram

Paretův diagram (viz Obrázek 12) je založen na principu, který spočívá v tom, že 80 % problémů (důsledků) způsobuje pouze 20 % příčin. Diagram je kombinací sloupcového a čárového grafu, kde sloupce znázorňují četnost pro jednotlivé kategorie, které jsou seřazeny podle velikosti, a čára představuje kumulativní četnost. To znamená, že tato čára (tzv. Lorenzova křivka) začíná na prvním sloupci a každý další její bod se postupně navyšuje nad ostatními sloupci o hodnotu odpovídající hodnotě daného sloupce [25].



Obrázek 12 - Ukázka Paretova diagramu

2.4 SPOLEHLIVOST STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ

2.4.1 Teorie spolehlivosti

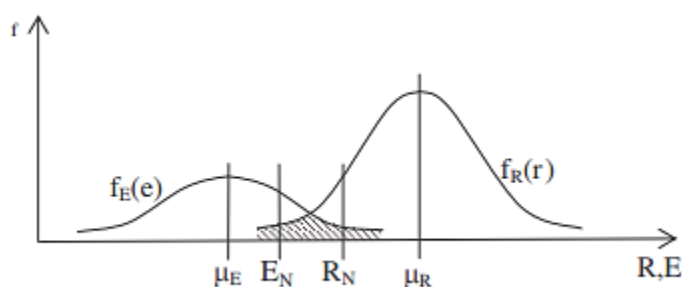
Spolehlivostí rozumíme schopnost konstrukce plnit požadované funkce při zachování provozních ukazatelů v daných mezích v požadovaném časovém úseku. Spolehlivost objektu je charakterizována z hlediska navrhování konstrukce jeho bezporuchovostí, životností, opravitelností a udržitelností. Mezi dílčí složky spolehlivosti patří např. bezpečnost, použitelnost nebo trvanlivost, zkráceně lze tedy říci, že spolehlivost je schopnost systému zachovávat požadované vlastnosti po předem stanovenou dobu jeho technického života [26].

Stavební objekt a jeho prvky musí splňovat celou řadu funkcí: estetickou, nosnou, izolační, provozní a další. V tomto textu se omezíme pouze na nosnou funkci stavebních konstrukcí či jejich prvků [26].

Spolehlivost je popsána jako pravděpodobnost toho, že požadované vlastnosti budou zachovány. Využíváme k tomu tzv. pravděpodobnost poruchy p_f a spolehlivost p , je pak určena vztahem [26]:

$$p_s = 1 - p_f. \quad (2-16)$$

Návrh konstrukce se obecně zakládá na dimenzování prvků konstrukce při působení zatížení tak, že je splněna řada požadavků na bezpečnost, použitelnost a trvanlivost. Jinými slovy, konstrukce by měla být navržena tak, že má vyšší pevnost (odolnost) než zatížení. Na Obrázku 13 jsou znázorněné dvě proměnné, a to zatížení E a odolnost R . Obě veličiny jsou náhodné, jejich náhodnost je charakterizována odpovídající hustotou pravděpodobnosti $f_E(e)$ a $f_R(r)$. Obrázek rovněž ukazuje deterministické (návrhové) hodnoty těchto základních parametrů, E_N a R_N , které jsou používány v klasickém přístupu dílčích součinitelů spolehlivosti. Vyšrafovaná plocha překrývajících se částí hustot pravděpodobnosti představuje oblast k výpočtu základní veličiny kvantifikující nespolehlivost – pravděpodobnost poruchy. Tato plocha závisí na relativní poloze křivek (dána středními hodnotami μ_E a μ_R), rozptylech veličin (směrodatnými odchylkami σ_E a σ_R) a tvaru obou křivek [26].



Obrázek 13 - Odolnost konstrukce R a účinek zatížení E - dvě náhodné veličiny [27]

Podmínka a rezerva spolehlivosti

Základní pojem klasické teorie spolehlivosti lze uvést matematicky formálněji ve tvaru odezvy (přetvoření, mezní stav, napětí, apod.) nebo rezervy spolehlivosti (v případě, že funkce představuje podmínku spolehlivosti) jako funkci základních náhodných veličin (nebo náhodných polí) $\mathbf{X} = X_1, X_2, \dots, X_n$. Rezerva spolehlivosti je vyjádřena vztahem:

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n), \quad (2-17)$$

kde funkce $g(\mathbf{X})$ představuje funkční závislost mezi složkami vektoru \mathbf{X} (výpočtový model). Prvky vektoru \mathbf{X} mohou být staticky závislé. Jestliže $g(\mathbf{X})$ představuje podmínku spolehlivosti, pak je funkce nazývána funkce mezního stavu nebo funkce poruchy. Konstrukce se považuje za spolehlivou, jestliže platí:

$$g(\mathbf{X}) = g(X_1, X_2, \dots, X_n) > 0. \quad (2-18)$$

Funkce poruchy může být explicitní nebo implicitní funkcí základních náhodných veličin a může být velmi jednoduchá nebo naopak velmi komplikovaná. Obvykle se pracuje s pravidlem $Z \leq 0$ (porucha) a $Z > 0$ (bezpečná konstrukce) [27].

Pravděpodobnost poruchy

Cílem analýzy spolehlivosti je odhad pravděpodobnosti zvaná teoretická pravděpodobnost poruchy:

$$p_f = P(Z \leq 0). \quad (2-19)$$

Formálněji je tato pravděpodobnost definována:

$$p_f = \int_{D_f} f(X_1, X_2, \dots, X_n) dX_1, dX_2, \dots, dX_n, \quad (2-20)$$

kde D_f představuje oblast poruchy, kde platí $g(\mathbf{X}) \leq 0$ a $f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ představuje funkci sdružené hustoty pravděpodobnosti náhodných veličin [27].

Index spolehlivosti

Index spolehlivosti (podle Cornella), který je všeobecně znám a rozšířen, lze nejlépe ukázat na funkci poruchy $Z = R - E$. Jestliže R a E jsou náhodné veličiny s normálním rozdělením pravděpodobnosti (a staticky nezávislé), pak také rezerva spolehlivosti Z má normální rozdělení. Situace je znázorněna na Obrázku 14. První dva statické momenty rezervy spolehlivosti Z je možné určit jednoduše jako:

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_E, \quad (2-21)$$

$$\sigma_Z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_E^2. \quad (2-22)$$

Index spolehlivosti je pak definován vztahem:

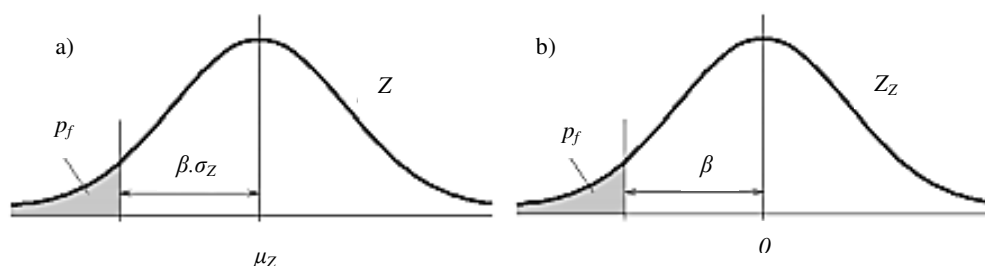
$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z}, \quad (2-23)$$

tedy jako převrácená hodnota variačního koeficientu rezervy spolehlivosti.

Z Obrázku 14 je zřejmé, že index spolehlivosti nám říká, kolikrát je možno umístit směrodatnou odchylku rezervy spolehlivosti mezi 0 a střední hodnotu μ . Pravděpodobnost poruchy zde odpovídá pravděpodobnosti, že rezerva spolehlivosti je záporná a protože Z je normálně rozdělená, pak ji lze snadno určit jako hodnotu distribuční funkce normálního rozdělení pravděpodobnosti:

$$p_f = \Phi_N(-\beta). \quad (2-24)$$

Tento index spolehlivosti je omezen na rezervu spolehlivosti s normálním rozdělením pravděpodobnosti [27].



Obrázek 14 - Rezerva spolehlivosti, index spolehlivosti, pravděpodobnosti poruchy, a) rezerva nenormovaná, b) rezerva normovaná [27]

2.4.2 Metody řešení spolehlivosti

Příchod rychlých počítačů umožnil rozvoj přesnějších metod pro výpočet pravděpodobnosti poruchy. Většina těchto metod je založena na integraci numerickou simulací typu Monte Carlo. Integrace Monte Carlo je snadno aplikovaná a všeobecně srozumitelná. Navíc lze nároky na výpočtový čas významně snížit pomocí speciálních technik redukce rozptylu. Z těchto technik se nejčastěji používá metoda Importace Sampling. Tato simulační metoda (aplikovaná v různých modifikacích) poskytuje velmi přesné odhady pravděpodobnosti poruchy ve srovnání s jinými postupy. Tyto metody bývají souhrnně označovány pojmem zdokonalené simulační metody. Snaha aplikovat metody, které snižují rozptyl odhadu spolehlivostních charakteristik je např. metoda Conditional nebo metoda Latin Hypercube Sampling (LHS). Tyto účinné metody dělají integraci Monte Carlo velmi

atraktivní, neboť statistická chyba odhadu pravděpodobnosti poruchy se aplikací těchto metod snižuje na minimum [26].

Metody k řešení spolehlivosti (tj. výpočtu pravděpodobnosti poruchy) lze obecně rozdělit na dvě základní skupiny – *simulační metody* založené na metodě Monte Carlo a *metody aproximační*. Aproximační metody pak buď aproximují funkci poruchy jednoduchou aproximační funkcí (a dále s ní pracují pomocí zdokonalených simulačních metod), nebo se aproximuje až empirická distribuční funkce rezervy spolehlivosti vhodným teoretickým modelem [26].

Simulační metody typu Monte Carlo

Metoda Monte Carlo ve své původní podobě (označovaná jako klasická, přímá, elementární, apod.) je metodou velmi jednoduchou a názornou a proto poměrně často používanou. Její názornost je blízká inženýrskému myšlení, neboť určitým způsobem simuluje reálné chování konstrukcí. Postup metody spočívá v numerické simulaci řešeného problému – v opakovaném řešení funkce poruchy vždy s jiným náhodně generovaným vektorem vstupních náhodných veličin \mathbf{X} . Jednotlivé kroky jsou následující (popisujeme obecně j -tou simulaci, $j=1, 2, \dots, N$, kde N je celkový počet simulací) [27]:

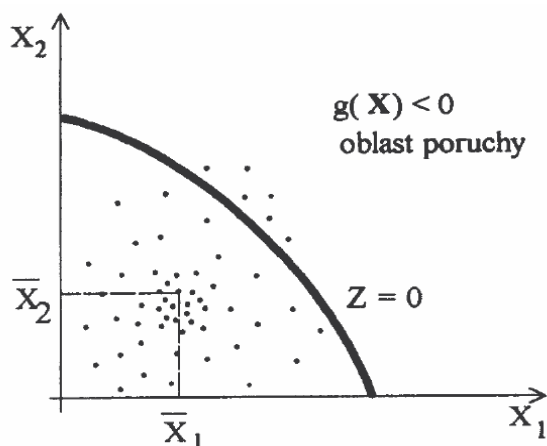
- Nejprve se generují jednotlivé realizace vektoru \mathbf{X} – realizace náhodných veličin podle svých příslušných rozdělení pravděpodobnosti.
- S pomocí těchto vygenerovaných realizací je vypočtena hodnota funkce poruchy a je tak získána hodnota rezervy spolehlivosti pro j -tou simulaci:

$$z_j = g(x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{i,j}, \dots, x_{n,j}). \quad (2-25)$$

- Po provedení všech simulací máme statistický soubor veličiny Z . Tento statistický soubor je možno vyhodnotit a získat tak odhad střední hodnoty, směrodatné odchylky, případně vyšších statistických momentů běžnými postupy matematické statistiky.
- V případě, že $z_j \leq 0$, nastává porucha a celkový počet těchto případů, které nastanou v průběhu všech N simulací, označme N_f . Pak pravděpodobnost lze odhadnout jako podíl

$$p_f = \frac{N_f}{N}. \quad (2-26)$$

Simulační metoda Monte Carlo pro výpočet pravděpodobnosti poruchy je zobrazen pro dvourozměrný případ ($n = 2$) na Obrázku 15, kde jsou pomocí bodů znázorněny jednotlivé realizace funkce poruchy Z [28].



Obrázek 15 - Simulace Monte Carlo - dvourozměrný případ [28].

Přesnost odhadu pravděpodobnosti závisí na celkovém počtu N simulací a řádu odhadové pravděpodobnosti. Čím větší je počet simulací a také počet realizací v oblasti poruchy, tím realističtější odhad obdržíme. Je nutné si uvědomit, že pravděpodobnost poruchy je také náhodná veličina a její odhad představuje určitou realizaci této náhodné veličiny. Změní-li se zdrojová čísla generátorů pro generování náhodných veličin, tak obdržíme trochu jiný odhad. Variační koeficient pravděpodobnosti poruchy lze napsat ve tvaru [27]:

$$v_{p_f} = \frac{1}{\sqrt{N \cdot p_f}}. \quad (2-27)$$

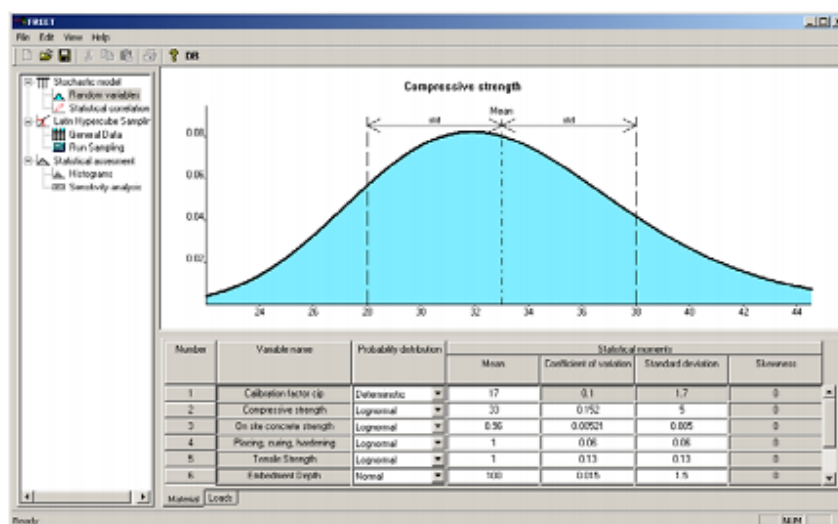
2.4.3 Software FReET

Pravděpodobnostní program FReET byl vyvinut týmem spolehlivostních inženýrů z Ústavu stavební mechaniky Fakulty stavební VUT v Brně a nabízí účinné nástroje k určení statistických charakteristik odezvy konstrukce [28]. Tento program je založen na stratifikované simulaci typu Monte Carlo – metodě LHS (Latin Hypercube Sampling). Tato metoda umožňuje řešit výpočetně náročné problémy tisíců či milionů náhodných realizací funkce poruchy. Realizace náhodných vstupních veličin se vybírají z předdefinovaných intervalů rozdělení pravděpodobností a vhodně se kombinují pro dosažení optimální efektivity výběru. Počet realizací se přitom nezvyšuje s rostoucím množstvím náhodných veličin. Pro výpočet korelační matice je použita metoda simulovaného žihání, která statisticko-iteračním způsobem optimalizuje generování realizací LHS a zajišťuje zavedení požadované korelace

mezi vstupními proměnnými. Důležitou součástí stochastického výpočtu je citlivostní analýza – možnost stanovení důležitosti vstupních proměnných, tedy jak významně každá z nich ovlivňuje výsledek řešení, například odolnost sledované konstrukce. V dalším kroku řešení je pak možné zaměřit se na důležité vstupní parametry a na upřesnění jejich charakteristik [29].

Po provedení řady výpočtů následuje statické zpracování výsledků. Výstupem jsou statistické charakteristiky odezvy – rozptyl, kvantil, střední hodnota apod., dále histogram a empirická distribuční funkce [29].

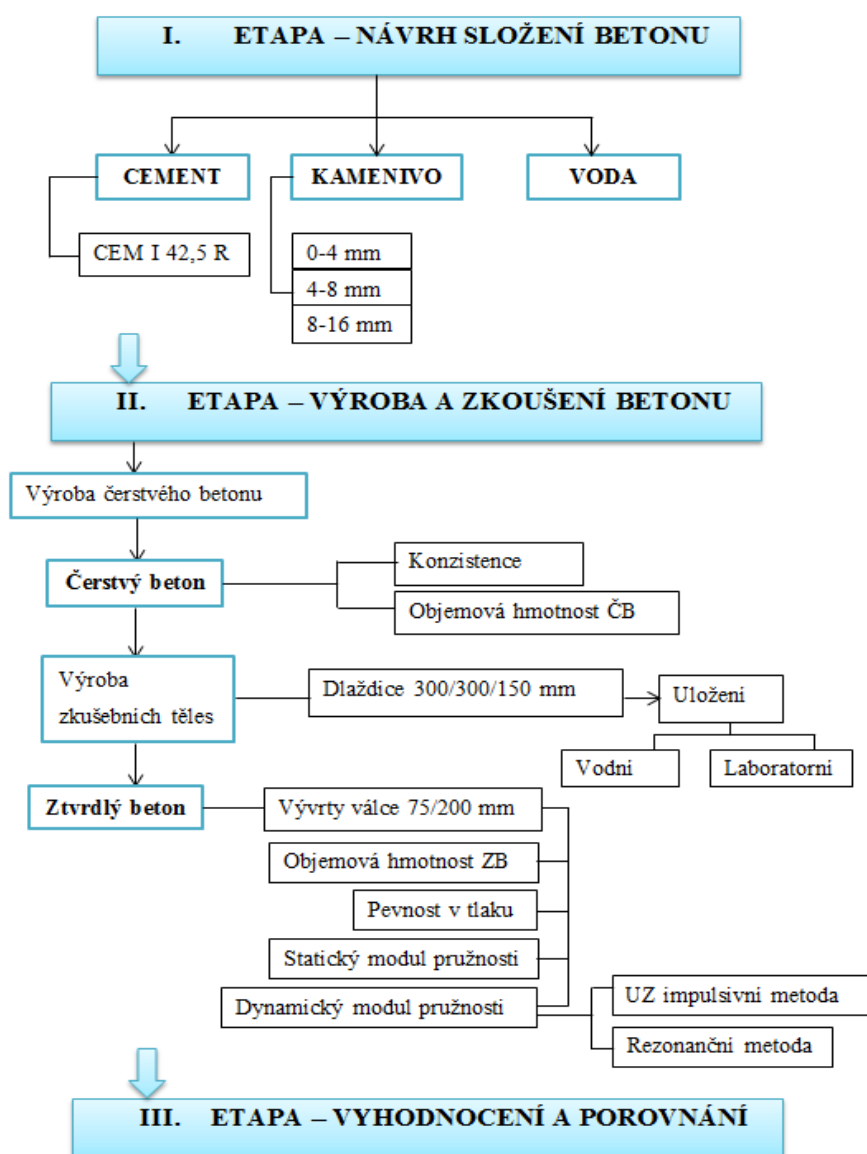
Software má interaktivní grafické prostředí, které nabízí uživateli přehledné zadávání i vyhodnocování všech potřebných statistických údajů - viz Obrázek 16.



Obrázek 16 - Panel zadávání vstupních veličin - Stochastic model [28]

3 METODIKA PRÁCE

Zásadní náplní této práce je ověření fyzikálně mechanických charakteristik na ztvrdlém konstrukčním betonu a jejich porovnání se standardy pro navrhování betonových konstrukcí. Mezi hlavní pozorované materiálové charakteristiky patří pevnost betonu v tlaku a statický i dynamický modul pružnosti betonu v tlaku. Metodika práce je členěna do jednotlivých základních etap (viz Obrázek 17) podle posloupnosti řešení. První etapa je zaměřena na jednotlivé vstupní suroviny pro návrh složení betonů. V druhé etapě je popsána výroba zkušebních těles a stanovení požadovaných charakteristik betonu. V poslední etapě je vyhodnocení a porovnání všech získaných výsledků.



Obrázek 17 – Vývojový diagram jednotlivých etap metodiky práce

3.1 NÁVRH SLOŽENÍ BETONU

Pro návrh receptur konstrukčních betonů byly vybrány základní vstupní suroviny bez příměsí a přísad a to cement, kamenivo a voda. Z těchto vstupních surovin byly namíchány čtyři receptury, které se lišily poměrem voda/cement, množstvím a frakcí kameniva. Příslušné vlastnosti složek byly kontrolovány v souladu s ČSN EN 196 [30], ČSN EN 933 [31] a ČSN EN 1008 [32].

Pro všechny receptury byl použit stejný cement třídy CEM I 42,5 R. Jedná se o portlandský cement a vysokými počátečními pevnostmi a s pevností v tlaku 42,5 MPa. Podstatnou vstupní složkou, která ovlivňuje pevnost a pružnost betonu je kamenivo. Použito bylo několik druhů kameniva lišící se lokalitou těžby, frakcí a typem zpracování. Obecně se jednalo o drobné kamenivo těžené a kopané frakce 0-4 mm a kameniva těžená či drcená hrubých frakcí 4-8 mm a 8-16 mm. Poslední nezbytnou součástí pro umožnění výroby betonu je voda, která byla použita z vodovodního řádu.

V Tabulce 3 je uveden jednotlivý soupis použitého kameniva, cementu a vody. Dále je v tabulce uveden vodní součinitel poměr voda/cement.

Tabulka 3 - Složky receptur

Složky betonu	Kamenivo [kg]			Cement 42,5 R [kg]	Voda [kg]	Poměr vody [-]
	Bratčice	Olbramovice	Olbramovice			
	0 až 4	4 až 8	8 až 16			
Směs R - C12/15 X0 S3 D16						
Směs R	953	173	675	248	201	0,75
Směs 0/1 - C20/25 X0 S3 D16						
Směs 0/1	925	182	696	308	203	0,61
Směs 0/2 - C30/37 X0 S3 D16						
Směs 0/2	889	174	693	357	201	0,53
Směs 0/3 - C35/45 X0 S3 D16						
Směs 0/3	826	195	669	392	208	0,50

3.2 VÝROBA A ZKOUŠENÍ BETONU

Druhá etapa se zabývala výrobou betonu a zkušebních těles vycházející z návrhu složení. Dále byla provedena řada laboratorních analýz na čerstvém i ztvrdlém betonu. Práce se zabývala zkoušením ztvrdlého betonu a to především měřením pevnosti v tlaku a měřením statického i dynamického modulu pružnosti.

Ze vstupních surovin byly namíchány čtyři typy receptur, které se od sebe lišily především vodním součinitelem. Pro stanovení požadovaných charakteristik ztvrdlých betonů byla vyrobena zkušební tělesa ve tvaru dlaždice o rozměru 300x300x150 mm. Dále probíhalo zrání betonu, kdy byly jednotlivé formy s čerstvým betonem uloženy na 24 hodin v laboratorním prostředí. Po odformování se tělesa ponořila do vodního prostředí po dobu 28 dní a poté byla opět uložena v laboratorním prostředí. Doba zrání u zkušebních těles větší než 28 dní by neměla u těchto typů betonů ovlivnit sledované charakteristiky.

Z dlaždic byla odebrána řada vývrtů o průměru 75 mm a délce 200 mm, které sloužily k provedení laboratorních analýz za účelem stanovení požadovaných fyzikálně mechanických vlastností betonu. Měření probíhalo v laboratořích na Ústavu stavebního zkušebnictví. Pevnost v tlaku byla zkoušena dle normy ČSN EN 12390-1 [3], statický modul pružnosti byl stanoven dle normy ČSN EN 12390-13 [11] a dynamický modul pružnosti dle normy ČSN 73 1371 [15,17].



Obrázek 18 - Ukázka měření pevnosti betonu v tlaku na zařízení FORM TEST



Obrázek 19 - Ukázka měření statického modulu pružnosti



Obrázek 20 - Ukázka měřícího UZ zařízení (přístroj TICO) pro stanovení dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku



Obrázek 21 - Přístrojové vybavení pro měření dynamického modulu pružnosti rezonanční metodou

3.3 VYHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

Třetí etapa se věnovala vyhodnocení a porovnání všech naměřených dat pro jednotlivé stanovené charakteristiky ztvrdlých betonů. V prvním kroku bylo provedeno posouzení a porovnání stanovených pevností betonů v tlaku a modulů pružnosti betonu na jednotlivých recepturách. Podstatná část byla zaměřena na porovnání reálně naměřených modulů pružnosti ve stáří větší než 28 dní a směrnou hodnotou modulu pružnosti uvedenou v normě ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [8], vycházející z pevnostní třídy betonu. Jelikož bylo porovnání prováděno na vzorkách starších, než je 28 dní, lze předpokládat, že se od hodnot uvedených v normě [8] ve stáří 28 dní, budou lišit.

3.3.1 Výsledky zkoušek z měření pevnosti betonu v tlaku

Obecně platí, že s rostoucím vodním součinitelem pevnost betonu v tlaku klesá. Tento fakt neplatí u receptur 0/2 a 0/3 z toho důvodu, protože rozdíl vodního součinitele mezi nimi je výrazně nižší, než je tomu u receptur R a 0/1 a stáří těles u receptur 0/2 a 0/3 vykazuje největší rozdíl – 63 dní. Z Grafu 1 je evidentní, že válcové pevnosti u receptur 0/1 a 0/2 se značně rozcházejí. Tato skutečnost může být daná rozdílem vodního součinitele, stářím těles, anebo zkušebními či technologickými vlivy. Největší hodnotu 54,7 MPa vykazuje receptura 0/2 s 260 denní válcovou pevností v tlaku, zatímco nejnižší hodnotu 20,2 MPa má receptura R s 340 denní válcovou pevností v tlaku.

Tabulka 4 - Výsledky těles zkoušených na pevnost v tlaku receptury R po 340 dnech

Receptura R							
Označení tělesa	Průměr [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [g]	Plocha [mm ²]	F _{max} [kN]	f _{ck} [MPa]	f _{ck} [MPa]
R-1 A2	74,20	203,93	1963,6	4324	88,8	20,5	20,2
R-1 B2	74,11	203,27	1954,0	4314	89,3	20,7	
R-2 A2	74,11	203,19	1960,0	4314	77,4	17,9	
R-2 B2	74,16	203,49	1954,6	4319	83,2	19,3	
R-3 A2	74,05	204,12	1968,8	4307	87,5	20,3	
R-3 B2	74,14	203,10	1963,4	4317	95,8	22,2	

Tabulka 5 - Výsledky těles zkoušených na pevnost v tlaku receptury 0/1 po 292 dnech

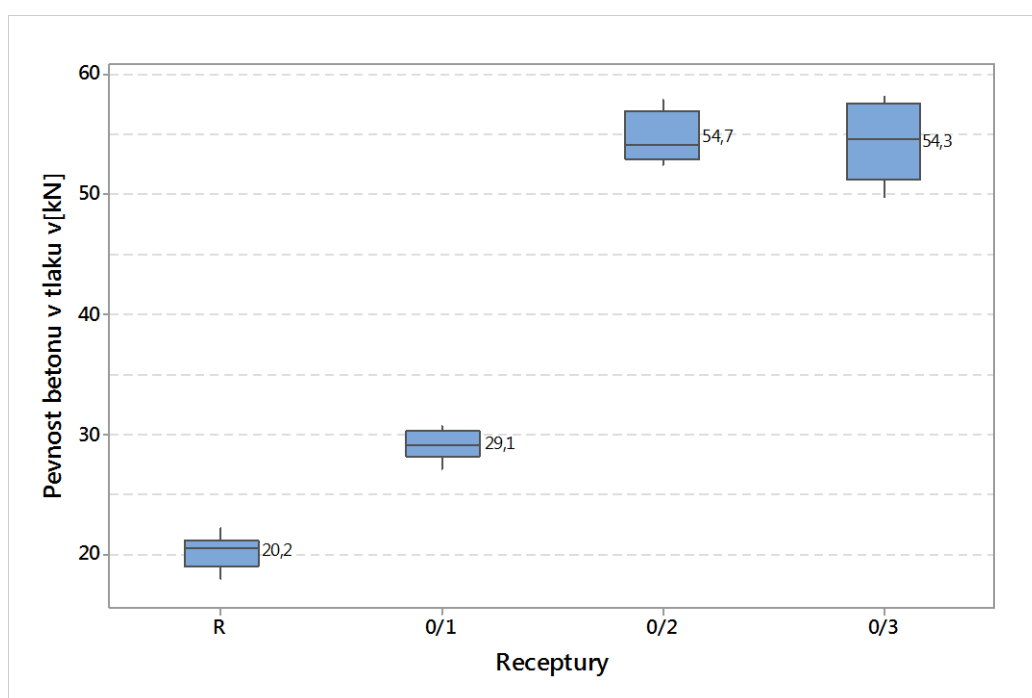
Receptura 0/1							
Označení tělesa	Průměr [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [g]	Plocha [mm ²]	F _{max} [kN]	f _{ck} [MPa]	f _{ck} [MPa]
0/1-1 A2	74,18	203,39	1957,0	4322	117,3	27,1	29,0
0/1-1 B2	74,11	203,47	1965,1	4314	122,8	28,5	
0/1-2 A2	74,20	203,68	1958,3	4324	130,2	30,1	
0/1-2 B2	74,17	204,09	1961,2	4321	132,2	30,6	
0/1-3 A2	74,15	203,60	1946,9	4318	125,0	28,9	
0/1-3 B2	74,11	203,99	1967,6	4314	125,2	29,0	

Tabulka 6 - Výsledky těles zkoušených na pevnost v tlaku receptury 0/2 po 260 dnech

Receptura 0/2							
Označení tělesa	Průměr [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [g]	Plocha [mm ²]	F _{max} [kN]	f _{ck} [MPa]	f _{ck} [MPa]
0/2-1 A2	75,24	201,11	2087,9	4446	251,8	56,6	54,7
0/2-1 B2	75,26	200,78	2071,7	4449	244,0	54,8	
0/2-2 A2	75,29	200,37	2068,7	4452	233,6	52,5	
0/2-2 B2	75,19	201,21	2005,2	4440	236,4	53,2	
0/2-3 A2	75,30	200,48	2003,9	4453	235,9	53,0	
0/2-3 B2	75,23	201,00	2079,9	4445	256,8	57,8	

Tabulka 7 - Výsledky těles zkoušených na pevnost v tlaku receptury 0/3 po 197 dnech

Receptura 0/3							
Označení tělesa	Průměr [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [g]	Plocha [mm ²]	F _{max} [kN]	f _{ck} [MPa]	f _{ck} [MPa]
0/3-1 A2	75,24	200,97	2075,2	4446	251,6	56,6	54,3
0/3-1 B2	75,18	201,09	2065,8	4439	254,2	57,3	
0/3-2 A2	75,21	201,29	2094,9	4443	229,8	51,7	
0/3-2 B2	74,22	200,63	2091,5	4326	214,9	49,7	
0/3-3 A2	74,12	200,93	2091,5	4315	250,9	58,1	
0/3-3 B2	74,19	201,16	2065,5	4323	226,4	52,4	



Graf 1- Průměrné válcové pevnosti v tlaku měřené na zkušebních tělesech

3.3.2 Výsledky zkoušek z měření statického modulu pružnosti v tlaku

Statický modul pružnosti betonu v tlaku měřený na zkušebních válcových tělesech vykazuje rostoucí tendenci s klesajícím vodním součinitelem (viz Graf 2). Nejlepších výsledků dosáhla zkušební tělesa receptury 0/3, u kterých byl naměřen statický modul pružnosti v tlaku 35,3 GPa. Podobných výsledků dosáhla i tělesa receptury 0/2 s hodnotou statického modulu pružnosti v tlaku 35 GPa. Oproti tomu tělesa receptur R a 0/1 dosáhla poněkud nižších hodnot. U těles receptury R byl naměřen statický modul pružnosti 24,5 GPa a u receptury 0/2 25,3 GPa.

Tabulka 8 - Výsledky naměřených statických modulů pružnosti receptury R

Receptura R				
Označení tělesa	zatěžovací meze [kN]	F _{max} [kN]	E _{c,s} [MPa]	E _{c,s} [MPa]
R-1 A2	5 → 27	88,8	24 500	24 500
R-1 B2	5 → 27	89,3	25 000	
R-2 A2	5 → 27	77,4	22 900	
R-2 B2	5 → 27	83,2	24 400	
R-3 A2	5 → 27	87,5	24 700	
R-3 B2	5 → 27	95,8	25 400	

Tabulka 9 - Výsledky naměřených statických modulů pružnosti receptury 0/1

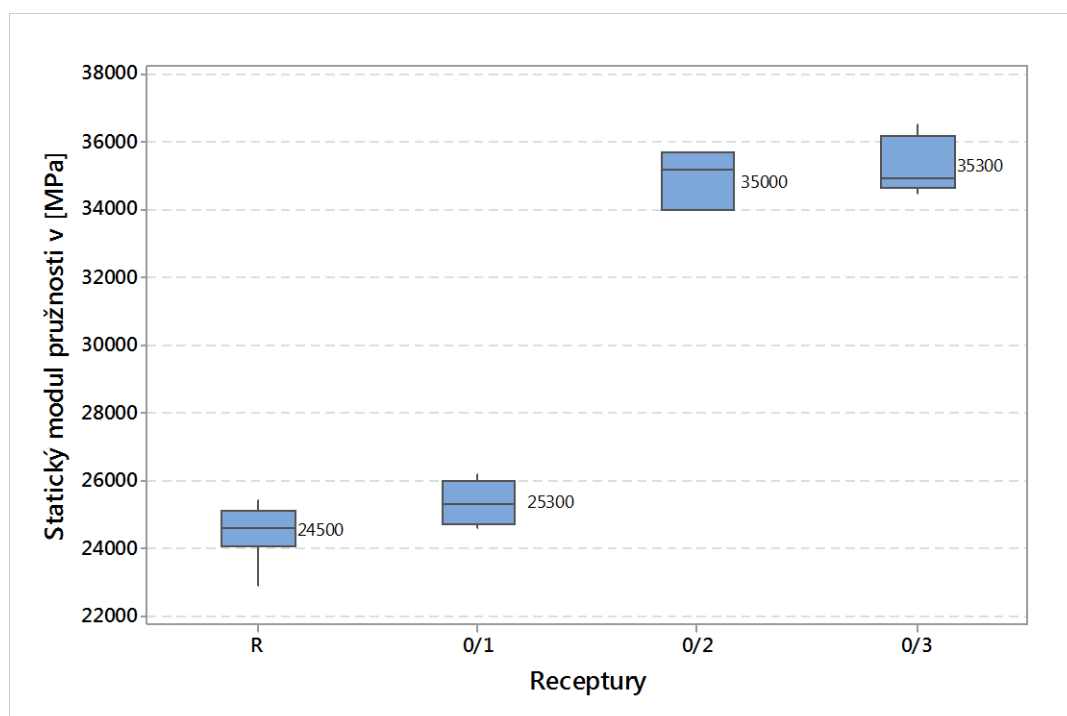
Receptura 0/1				
Označení tělesa	zatěžovací meze [kN]	F _{max} [kN]	E _{c,s} [MPa]	E _{c,s} [MPa]
0/1-1 A2	5 → 40	117,3	25 200	25 300
0/1-1 B2	5 → 40	122,8	24 700	
0/1-2 A2	5 → 40	130,2	26 200	
0/1-2 B2	5 → 40	132,2	25 900	
0/1-3 A2	5 → 40	125,0	24 600	
0/1-3 B2	5 → 40	125,2	25 400	

Tabulka 10 - Výsledky naměřených statických modulů pružnosti receptury 0/2

Receptura 0/2				
Označení tělesa	zatěžovací meze [kN]	F _{max} [kN]	E _{c,s} [MPa]	E _{c,s} [MPa]
0/2-1 A2	5 → 66	251,8	34 800	35 000
0/2-1 B2	5 → 66	244,0	35 700	
0/2-2 A2	5 → 66	233,6	34 000	
0/2-2 B2	5 → 66	236,4	34 000	
0/2-3 A2	5 → 66	235,9	35 600	
0/2-3 B2	5 → 66	256,8	35 700	

Tabulka 11 - Výsledky naměřených statických modulů pružnosti receptury 0/3

Receptura 0/3				
Označení tělesa	zatěžovací meze [kN]	F _{max} [kN]	E _{c,s} [MPa]	E _{c,s} [MPa]
0/3-1 A2	5 → 71	251,6	36 500	35 300
0/3-1 B2	5 → 71	254,2	34 900	
0/3-2 A2	5 → 71	229,8	34 700	
0/3-2 B2	5 → 71	214,9	34 500	
0/3-3 A2	5 → 71	250,9	34 900	
0/3-3 B2	5 → 71	226,4	36 100	



Graf 2 - Průměrné statické moduly pružnosti v tlaku měřené na zkušebních tělesech

3.3.3 Výsledky zkoušek z měření dynamického modulu pružnosti UZ impulsivní metodou

U dynamického modulu pružnosti měřeného ultrazvukovou impulsivní metodou byla dle předpokladu naměřena vyšší hodnota, než je tomu u hodnot statického modulu pružnosti. V Grafu 3 jsou vyneseny průměrné hodnoty všech zkoušených receptur. Stejnou odchylku, jako u receptur statického modulu pružnosti, vykazují i receptury dynamického modulu, kde receptury R a 0/1 se značně rozcházejí s recepturami 0/2 a 0/3.

Tabulka 12 - Výsledky naměřených dynamických modulů pružnosti receptury R

Receptura R								
Označení tělesa	UZ - T _{1,2,3} [μs]			ρ [kg/m ³]	V _L [m/s]	k [-]	E _{bu} [MPa]	E _{bu} [MPa]
R-1 A2	53,0	53,6	53,1	2 227	3 830,87	1,068	28 600	28 800
R-1 B2	51,8	51,9	52,0	2 228	3 916,57		29 900	
R-2 A2	54,1	53,6	53,2	2 236	3 788,50		28 100	
R-2 B2	53,3	53,5	53,6	2 224	3 805,92		28 200	
R-3 A2	53,6	54,0	53,3	2 240	3 805,84		28 400	
R-3 B2	52,5	52,7	52,2	2 239	3 871,03		29 400	

Tabulka 13 - Výsledky naměřených dynamických modulů pružnosti receptury 0/1

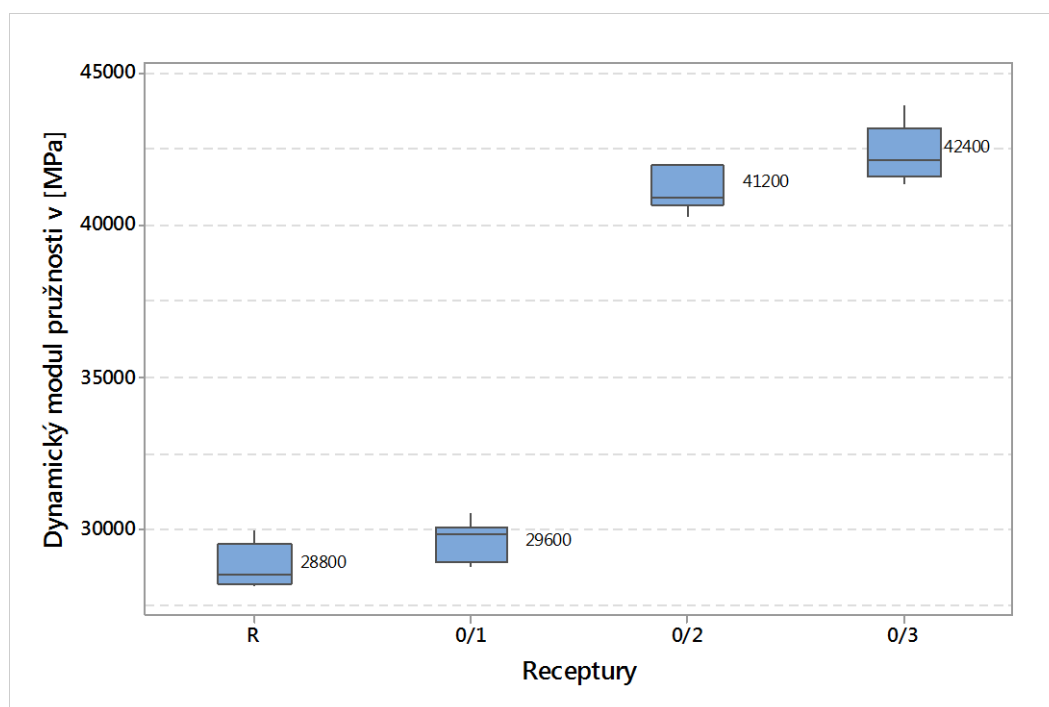
Receptura 0/1								
Označení tělesa	UZ - T _{1,2,3} [μs]			ρ [kg/m ³]	V _L [m/s]	k [-]	E _{bu} [MPa]	E _{bu} [MPa]
0/1-1 A2	53,0	53,5	53,2	2 226	3 820,73	1,061	28 900	29 600
0/1-1 B2	52,6	52,0	52,9	2 239	3 875,62		29 900	
0/1-2 A2	52,0	52,6	52,4	2 223	3 891,97		29 900	
0/1-2 B2	52,7	52,7	52,5	2 224	3 877,58		29 700	
0/1-3 A2	53,4	53,3	52,8	2 214	3 829,47		28 800	
0/1-3 B2	52,4	51,9	51,9	2 236	3 917,86		30 500	

Tabulka 14 - Výsledky naměřených dynamických modulů pružnosti receptury 0/2

Receptura 0/2								
Označení tělesa	UZ - T _{1,2,3} [μs]			ρ [kg/m ³]	V _L [m/s]	k [-]	E _{bu} [MPa]	E _{bu} [MPa]
0/2-1 A2	44,4	44,3	44,5	2 335	4 529,50	1,068	42 000	41 200
0/2-1 B2	44,1	44,2	44,1	2 319	4 549,40		42 000	
0/2-2 A2	44,7	44,6	44,9	2 319	4 479,21		40 800	
0/2-2 B2	44,3	44,5	44,6	2 244	4 524,96		40 300	
0/2-3 A2	43,8	44,0	44,1	2 245	4 559,82		40 900	
0/2-3 B2	45,1	44,9	44,6	2 328	4 479,94		40 900	

Tabulka 15 - Výsledky naměřených dynamických modulů pružnosti receptury 0/3

Receptura 0/3								
Označení tělesa	UZ - T _{1,2,3} [μs]			ρ [kg/m ³]	V _L [m/s]	k [-]	E _{bu} [MPa]	E _{bu} [MPa]
0/3-1 A2	44,0	44,0	44,1	2 322	4 564,04	1,077	41 700	42 400
0/3-1 B2	44,4	44,0	44,1	2 314	4 552,98		41 400	
0/3-2 A2	44,3	44,3	44,4	2 343	4 540,38		41 700	
0/3-2 B2	44,2	44,0	44,1	2 410	4 549,43		43 000	
0/3-3 A2	43,8	43,8	43,6	2 412	4 594,44		43 900	
0/3-3 B2	44,5	43,9	43,8	2 375	4 564,90		42 700	



Graf 3 - Průměrné dynamické moduly pružnosti měřené na zkušebních tělesech UZ impulsivní metodou

3.3.4 Výsledky zkoušek z měření dynamického modulu pružnosti rezonanční metodou

Na zkušebních tělesech byly naměřeny hodnoty kmitočtů podélného, příčného a kroutivého kmitání, z kterých byl následně vypočten dynamický modul pružnosti E_{crL} , E_{crf} , a G_{cr} . Z vynesení hodnot (viz Graf 4) lze vidět rozdílnost mezi podélným, příčným a kroutivým dynamickým modulem pružnosti, kde nejvyšší hodnotu má podélný dynamický modul pružnosti a nejnižší má dynamický modul pružnosti ve smyku. Stejně jako je tomu u předchozích výsledků, tak i dynamický modul měřený rezonanční metodou má stejnou tendenci růst s ubývajícím hodnotou vodního součinitele. Nejvyšší hodnotu modulu pružnosti vykazuje dynamický modul ve směru podélném receptura 0/3 – 41,4 GPa. Dynamický modul měřený na tělesech v příčném směru je u receptury 0/3 o trochu nižší – 40,8 GPa. Nejnižší hodnotu vykazuje dynamický modul pružnosti ve smyku u receptury R – 11,6 GPa.

Tabulka 16- Výsledky naměřených dynamických modulů pružnosti receptury R

Receptura R								
Označení tělesa	REZ - $f_{L,f,t}$ [Hz]			E_{crL} [MPa]	E_{crL} [MPa]	E_{crf} [MPa]	E_{crf} [MPa]	G_{cr} [MPa]
R-1 A2	8692	4448	5597	28 000	28 100	28 500	27 800	11 600
R-1 B2	8751	4424	5631	28 200		27 900		11 700
R-2 A2	8574	4307	5537	27 100		26 500		11 300
R-2 B2	8697	4373	5624	27 900		27 300		11 600
R-3 A2	8687	4383	5577	28 200		28 000		11 600
R-3 B2	8845	4474	5706	28 900		28 600		12 000
								11 600

Tabulka 17 - Výsledky naměřených dynamických modulů pružnosti receptury 0/1

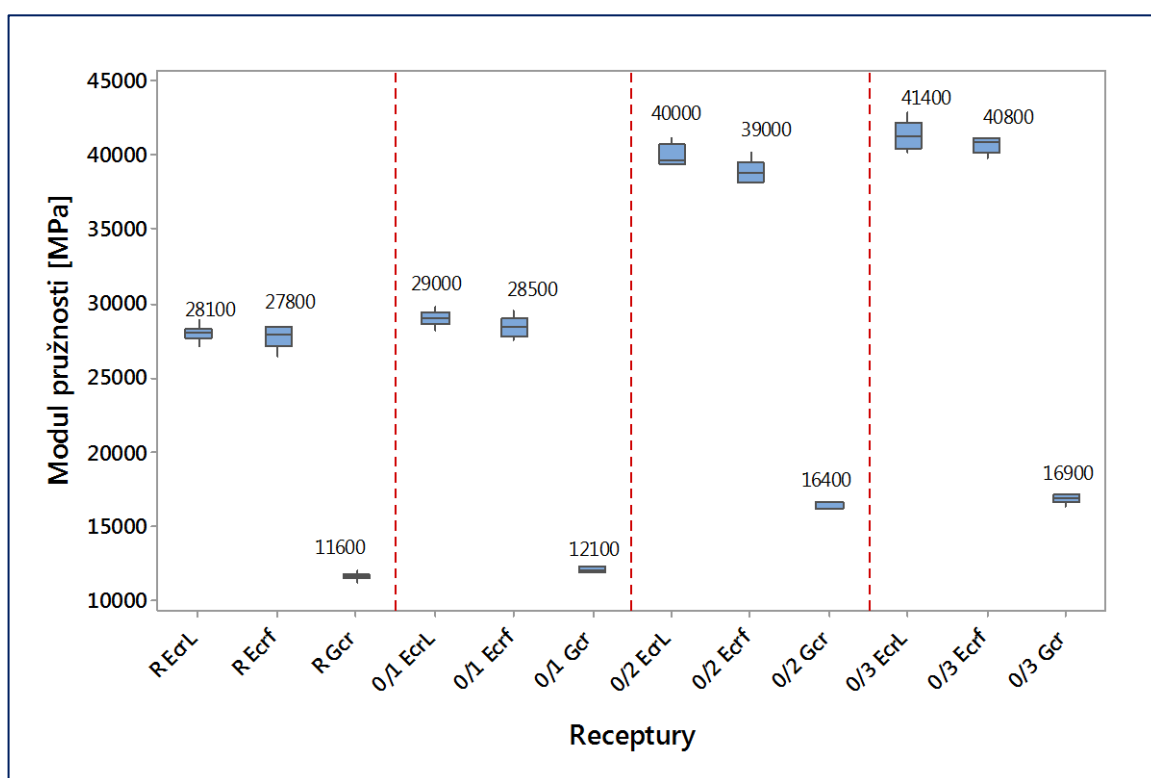
Receptura 0/1								
Označení tělesa	REZ - $f_{L,f,t}$ [Hz]			E_{crL} [MPa]	E_{crL} [MPa]	E_{crf} [MPa]	E_{crf} [MPa]	G_{cr} [MPa]
0/1-1 A2	8877	4431	5699	29 000	29 000	28 000	28 500	12 000
0/1-1 B2	8845	4447	5672	29 000		28 400		11 900
0/1-2 A2	8985	4490	5775	29 800		28 900		12 300
0/1-2 B2	8803	4442	5734	28 700		28 500		12 200
0/1-3 A2	8781	4404	5665	28 300		27 600		11 800
0/1-3 B2	8877	4523	5768	29 300		29 600		12 400
								12 100

Tabulka 18 - Výsledky naměřených dynamických modulů pružnosti receptury 0/2

Receptura 0/2								
Označení tělesa	REZ - $f_{L,f,t}$ [Hz]			E_{crL} [MPa]	E_{crL} [MPa]	E_{crf} [MPa]	E_{crf} [MPa]	G_{cr} [MPa]
0/2-1 A2	10382	5331	6650	40 700	40 000	39 400	39 000	16 700
0/2-1 B2	10491	5417	6692	41 200		40 200		16 700
0/2-2 A2	10324	5359	6607	39 700		39 000		16 300
0/2-2 B2	10413	5348	6707	39 400		38 200		16 300
0/2-3 A2	10480	5417	6707	39 600		38 700		16 200
0/2-3 B2	10248	5257	6572	39 500		38 200		16 200
								16 400

Tabulka 19 - Výsledky naměřených dynamických modulů pružnosti receptury 0/3

Receptura 0/3									
Označení tělesa	REZ - $f_{L,f,t}$ [Hz]			E_{crL} [MPa]	E_{crL} [MPa]	E_{crf} [MPa]	E_{crf} [MPa]	G_{cr} [MPa]	G_{cr} [MPa]
0/3-1 A2	10480	5405	6692	41 200	41 400	40 800	40 800	16 800	16 900
0/3-1 B2	10380	5377	6614	40 300		40 400		16 400	
0/3-2 A2	10347	5382	6642	40 600		41 100		16 700	
0/3-2 B2	10402	5348	6650	42 000		41 200		17 200	
0/3-3 A2	10491	5336	6671	42 900		41 300		17 300	
0/3-3 B2	10391	5274	6650	41 500		39 900		17 000	



Graf 4 - Průměrné dynamické moduly pružnosti E_{crL} , E_{crf} a G_{cr} měřené na zkušebních tělesech rezonanční metodou

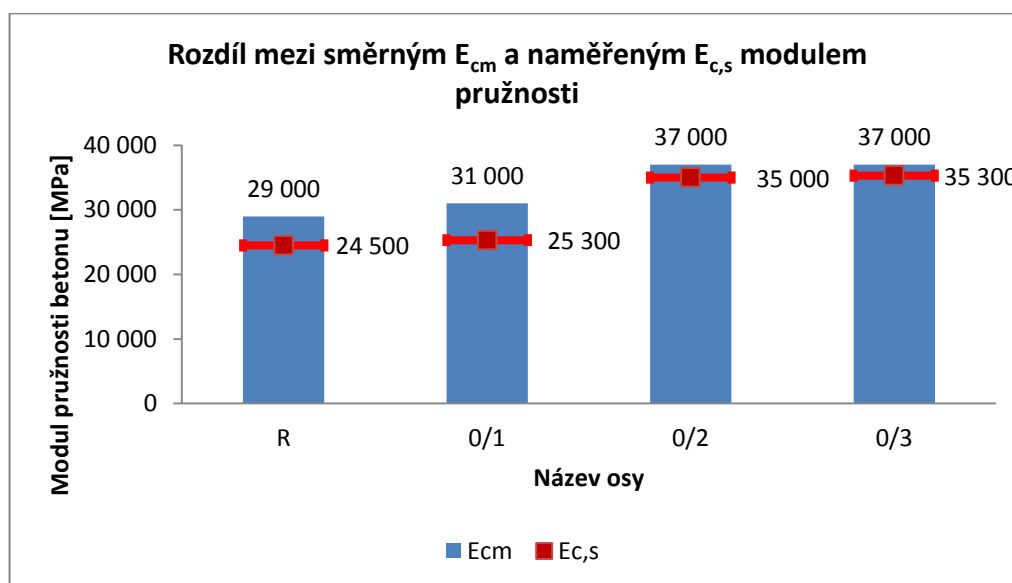
3.3.5 Porovnání výsledků

Pevnostní třída jednotlivých betonů byla odvozena na základě stanovené průměrné hodnoty válcové pevnosti f_{ck} . Ke každé pevnostní třídě dle ČSN EN 1992-1-1 [8] je přiřazena směrná hodnota modulu pružnosti E_{cm} a porovnává s hodnotou reálně naměřenou na zkušebních tělesech (viz Graf 6). Jak je patrné z Tabulky 20 ani jedna z receptur nedosáhla požadované směrné hodnoty. Naměřená hodnota receptury 0/3 se v porovnání s ostatními recepturami nejvíce blížila směrné hodnotě, a to s 4,8% odchylkou (1 700 MPa). Tato

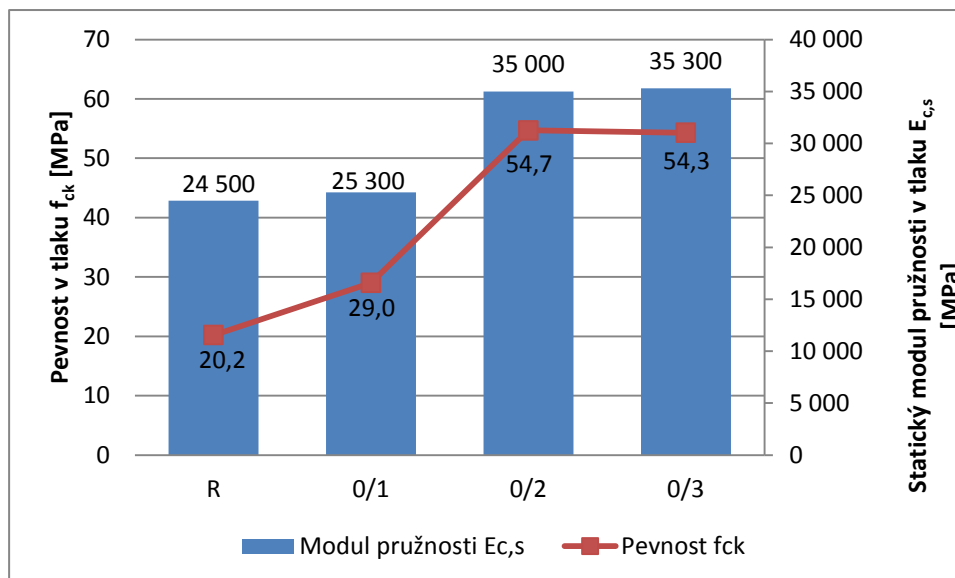
variabilita výsledků modulů pružnosti je dána především technologickými a zkušebními vlivy. Grafické vyjádření porovnání hodnoty reálně naměřeného statického modulu pružnosti v tlaku $E_{c,s}$ a hodnoty směrného modulu pružnosti E_{cm} , deklarovaného normou ČSN EN 1992-1-1 [8], je zobrazeno v Grafu 5.

Tabulka 20 - Porovnání směrných a naměřených modulů pružnosti betonu v tlaku

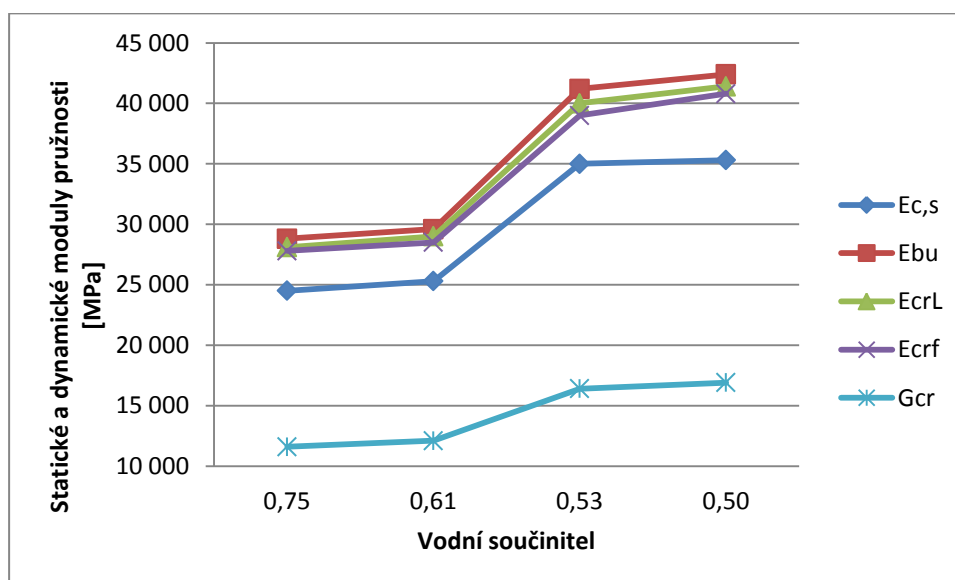
Receptury	R	0/1	0/2	0/3
Válcová pevnost v tlaku f_{ck} [MPa]	20,2	29,0	54,7	54,3
Pevnostní třída [-]	16/20	25/30	50/60	50/60
Směrná hodnota modulu pružnosti v tlaku E_{cm} [MPa]	29 000	31 000	37 000	37 000
Naměřená hodnota modulu pružnosti v tlaku $E_{c,s}$ [MPa]	24 500	25 300	35 000	35 300
Procentuální odchylka E_{cm} a $E_{c,s}$ [%]	18,4	22,5	5,7	4,8



Graf 5 - Porovnání statického modulu pružnosti betonu v tlaku $E_{c,s}$ naměřeném na zkušebních tělesech R–0/3 vs. Směrná hodnota modulu pružnosti E_{cm} dle ČSN EN 1992-1-1 [8]



Graf 6 – Porovnání modulu pružnosti a pevnosti betonu v tlaku



Graf 7 - Vliv vodního součinitele w na moduly pružnosti $E_{c,s}$, E_{bu} , E_{crl} , E_{crf} , G_{cr}

Jak již bylo zmíněno výše, tak pevnost betonu i modul pružnosti je závislý na vodním součiniteli. Tuto skutečnost značí Graf 7, v kterém jsou znázorněny výsledné křivky hodnot statických a dynamických modulů pružnosti. Nejvyšších hodnot dosáhl dynamický modul pružnosti měřený UZ impulsivní metodou, poté dynamický modul pružnosti podélný a příčný měřený rezonanční metodou a o trochu nižší hodnoty byly naměřeny u statického modulu pružnosti, zatímco modul pružnosti ve smyku měřený rezonanční metodou dosáhl hodnot nejnižších.

Porovnání výsledků v softwaru FReET

Vzniklý rozptyl hodnot, mezi naměřenými a směrnými moduly pružnosti, má velký vliv na výsledný průhyb konstrukce. Pomocí programu FReET (viz kapitola 2.4.3) si na jednoduchém příkladu prostého nosníku ukážeme výpočet rezervy spolehlivosti dle druhého mezního stavu použitelnosti SLS.

V tabulce 21 jsou specifikovány vstupní veličiny – modul pružnosti naměřený na zkušebních tělesech, směrný modul pružnosti, délka nosníku, šířka nosníku, tloušťka nosníku a síla působící vprostřed pole. U modulů pružnosti a síly bylo zvoleno normální rozdělení, zatímco u délky, šířky a tloušťky nosníku bylo zvoleno rozdělení deterministické.

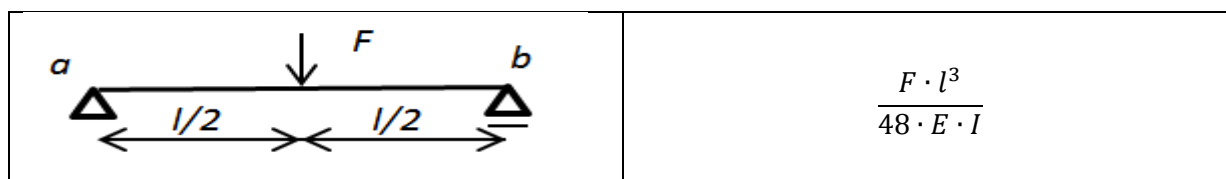
Tabulka 21 - Vstupní veličiny

Název	Značení	Jednotky	Rozdělení	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	CoV
Naměřený modul pružnosti	$E_{c,s} 1$	MPa	Normal	24 500	1	4,08E-05
Naměřený modul pružnosti	$E_{c,s} 2$	MPa	Normal	25 300	1	3,95E-05
Naměřený modul pružnosti	$E_{c,s} 3$	MPa	Normal	35 000	1	2,86E-05
Naměřený modul pružnosti	$E_{c,s} 4$	MPa	Normal	35 300	1	2,83E-05
Směrný modul pružnosti	$E_{cm} 1$	MPa	Normal	29 000	1	3,33E-05
Směrný modul pružnosti	$E_{cm} 2$	MPa	Normal	31 000	1	3,03E-05
Směrný modul pružnosti	$E_{cm} 3$	MPa	Normal	37 000	1	2,63E-05
Směrný modul pružnosti	$E_{cm} 4$	MPa	Normal	37 000	1	2,63E-05
Délka nosníku	l	m	Deterministic	6	-	-
Šířka nosníku	b	m	Deterministic	2	-	-
Tloušťka nosníku	h	m	Deterministic	0,3	-	-
Síla	F	kN	Normal	700	35	0,05

Pro výpočet pravděpodobnosti poruchy byla zvolena pravděpodobnostní technika metoda Monte Carlo s počtem simulací $N = 10000$ (viz Obrázek 22).

Obrázek 22 - Vzorkování veličin

Jako jednoduchý model konstrukce byl zvolen prostý nosník, který je zatížen normálovou silou působící vprostřed (viz Obrázek 23). Tento jednoduchý příklad nosníku bude posouzen dle druhého mezního stavu použitelnosti SLS.



Obrázek 23 - Vztah pro výpočet průhybu prostého nosníku se silou působící vprostřed pole

Do funkce Model Analysis (viz Obrázek 24) se zadali požadované rovnice (3-2, 3-3), které se použili v podmínce spolehlivosti

$$G = w_{lim} - w, \quad (3-1)$$

kde w_{lim} limitní průhyb nosníku,

w je průhyb nosníku.

Limitní průhyb se vypočítá ze vztahu:

$$w_{lim} = \frac{l}{200}, \quad (3-2)$$

kde l je délka nosníku a průhyb nosníku zatížen silou působící vprostřed se vypočítá ze vztahu:

$$w = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (3-3)$$

kde F je síla působící vprostřed pole (kN),

l je délka nosníku (m),

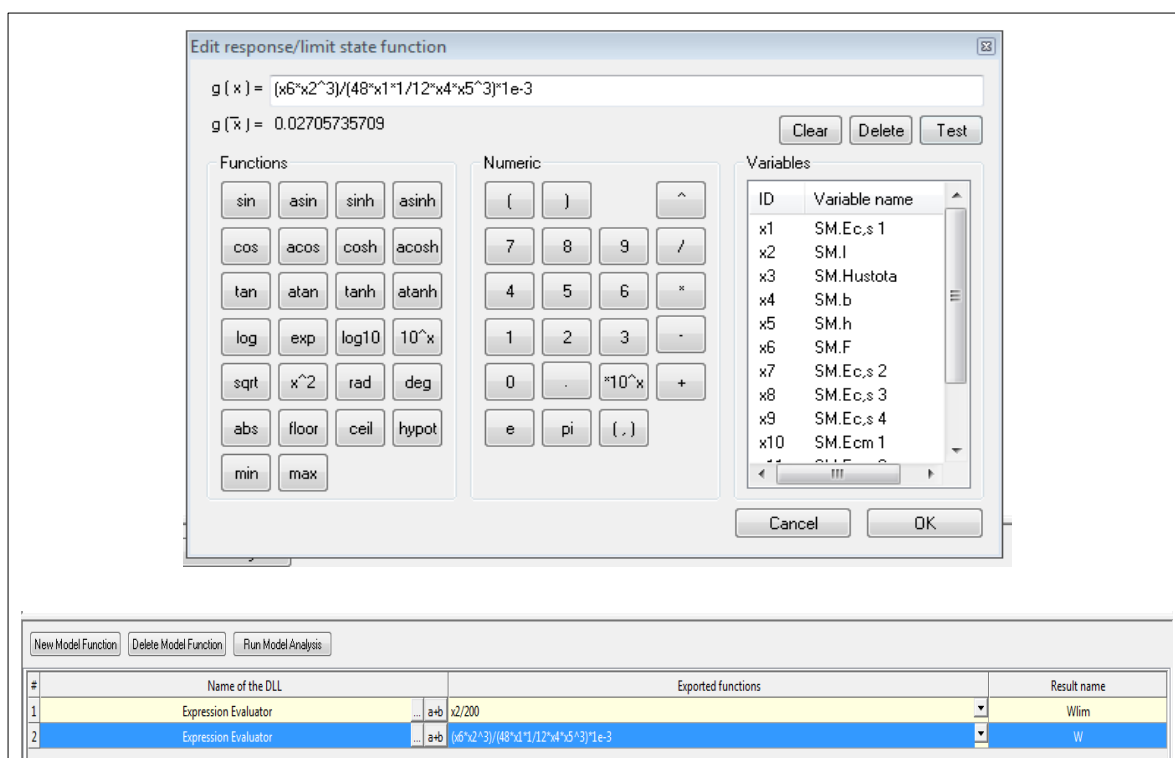
E je modul pružnosti betonu (MPa),

I je moment setrvačnosti ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$), který se vypočítá ze vztahu:

$$I = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3, \quad (3-4)$$

kde b je šířka nosníku (m),

h je výška (tloušťka) nosníku (m).



Obrázek 24 - Zadávání rovnic

Ve výsledku bylo vygenerováno osm příkladů průhybu nosníku s měnícím se modulem pružnosti. Aby byla přehledně ukázána problematika týkající se vlivu modulu pružnosti na výsledný průhyb konstrukce, byla u příkladů se směrnými moduly pružnosti pravděpodobnost poruchy nulová (viz Obrázek 25). Největší pravděpodobnost poruchy $p_f = 15,942 \%$ (viz Obrázek 26) byla zjištěna u nosníku s nejmenším modulem pružnosti $E_{c,s 1} = 24\,500$ MPa naměřeným u receptury R. Pravděpodobnost poruchy vznikla také u nosníku s modulem pružnosti $E_{c,s 2} = 25\,300$ MPa, kde $p_f = 4,602 \%$. U zbývajících dvou nosníků s $E_{c,s 3} = 35\,000$ MPa a $E_{c,s 4} = 35\,300$ MPa byla pravděpodobnost poruchy nulová. Citlivostní analýza (viz Obrázek 27) ukázala, že největší vliv na pravděpodobnost poruchy má

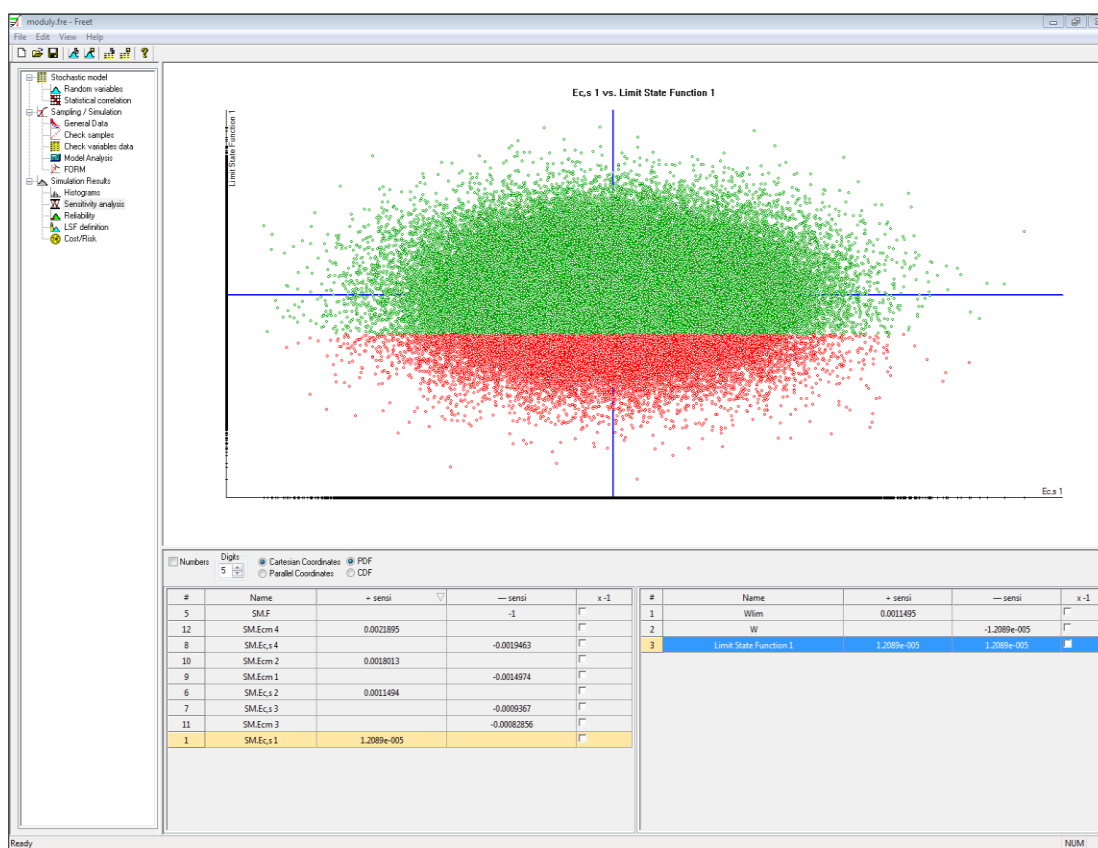
dle očekávání zatížení, které působí na nosník. Dále je to samozřejmě modul pružnosti betonu, tloušťka, šířka i délka nosníku.

#	Result name	Classes	Mean	Std	COV	Cornell - B	Cornell - pf	CF - Distribution	CF - pf	CF - SL	Nf/Ntot	COV pf
1	Wlim	100	0.03	0	0	***	0	Deterministic	0	0	0	***
2	W	100	0.023337	0.001172	0.050223	19.911	1.6254e-088	Skew-Normal	3.2842e-085	0.20105	0	***
3	Limit State Function 1	100	0.0066635	0.001172	0.17589	5.6854	6.5237e-009	Skew-Normal	0	0.20105	0	***

Obrázek 25 - Pravděpodobnost poruchy s E_{cm} 1

#	Result name	Classes	Mean	Std	COV	Cornell - B	Cornell - pf	CF - Distribution	CF - pf	CF - SL	Nf/Ntot	COV pf
1	Wlim	100	0.03	0	0	***	0	Deterministic	0	0	0	***
2	W	100	0.028575	0.0014351	0.050223	19.911	1.6255e-088	Skew-Normal	3.2354e-085	0.19723	0	***
3	Limit State Function 1	100	0.0014247	0.0014351	1.0073	0.99271	0.16043	Skew-Normal	0.16041	0.19723	0.15942	0.0079201

Obrázek 26 - Pravděpodobnost poruchy s $E_{c,s}$ 1



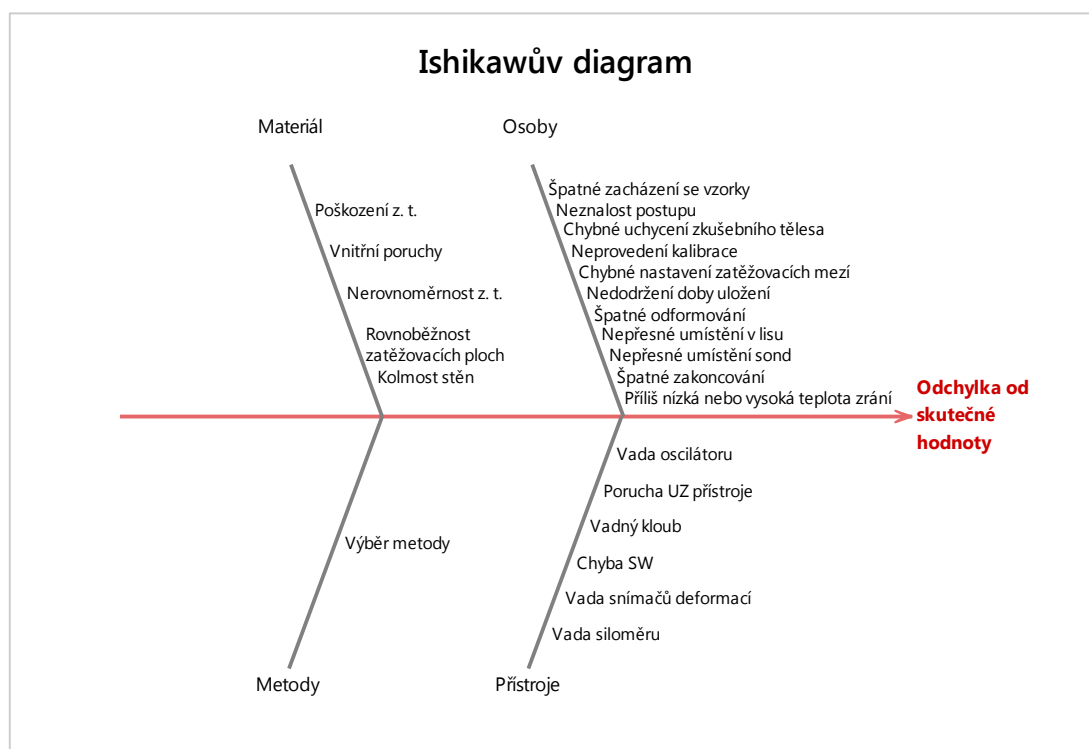
Obrázek 27 - Citlivostní analýza nosníku s $E_{c,s}$ 1

3.4 APLIKACE VYBRANÝCH METOD

Diplomová práce se z větší části zabývá zkoušením fyzikálně mechanických vlastností na zkušebních tělesech. Proto pro aplikaci vybraných metod byl zvolen proces zkoušení betonu.

3.4.1 Analýza příčin a důsledků – Ishikawův diagram

Diagram uvádí příčiny, které při zkoušení betonu způsobují odchylku od skutečné hodnoty. Pro proces zkoušení betonu jsou vybrány čtyři kategorie – materiál, osoby, přístroje, metody, a ke každé jsou přiřazeny příčiny vzniku rizika. Nejvíce rizik, která mohou ve výsledku způsobit odchýlení hodnot od hodnot skutečných, vzniká v kategorii osoby. Proto, aby k odchýlení hodnot nedocházelo, se jako opatření doporučuje provádět průběžné kontroly přístrojů, kontroly nad dodržováním technologických postupů a věnovat zvýšenou pozornost při zacházení se vzorky.



Obrázek 28 - Ishikawův diagram aplikován na proces zkoušení betonu

3.4.2 Analýza důsledků a způsobů poruch – FMEA

Metodou FMEA byly hodnoceny jednotlivé oblasti rizika u procesu zkoušení betonu. Tabulka 23 uvádí popis jednotlivých rizik, jejich příčiny a následky, vykalkulované RPN, které bylo po doporučeném opatření jednotlivých rizik sníženo. Pro určení rizikového

prioritního čísla RPN je potřebné zvolit si stupnici hodnocení (viz Tabulka 22) pro závažnost rizik, jejich pravděpodobnost výskytu a možnost jejich odhalení.

Tabulka 22 - Stupnice hodnocení

PRAVDĚPODOBNOST VÝSKYTU		
Pravděpodobnost výskytu rizika	Popis	Klasifikace
Velmi vysoká	Riziko je jisté.	5
Vysoká	Riziko je téměř zcela jisté.	4
Střední	Příležitostný výskyt rizika.	3
Nízká	Ojedinelý výskyt rizika.	2
Velmi nízká	Výskyt rizika je nepravděpodobný.	1

DOPAD		
Účinek	Popis	Klasifikace
Nebezpečný	Velmi vysoké hodnocení závažnosti. Katastrofické účinky na člověka i konstrukci.	5
Vysoký	Dopad je závažný a je potřeba akutního řešení.	4
Střední	Konstrukce je funkční, ale potřeba řešení je naléhavé.	3
Nízký	Dopad nezávažný. Řešení není naléhavé.	2
Nevýznamné	Nevýznamné, někomu nehrozí újma.	1

ODHALITELNOST		
Odhalení	Popis	Klasifikace
Téměř vyloučené	Absolutní jistota, že nebude odhaleno.	5
Nízké	Nízká pravděpodobnost odhalení	4
Střední	Možná pravděpodobnost odhalení.	3
Vysoké	Vysoká pravděpodobnost odhalení.	2
Velmi vysoké	Odhalení je jisté.	1

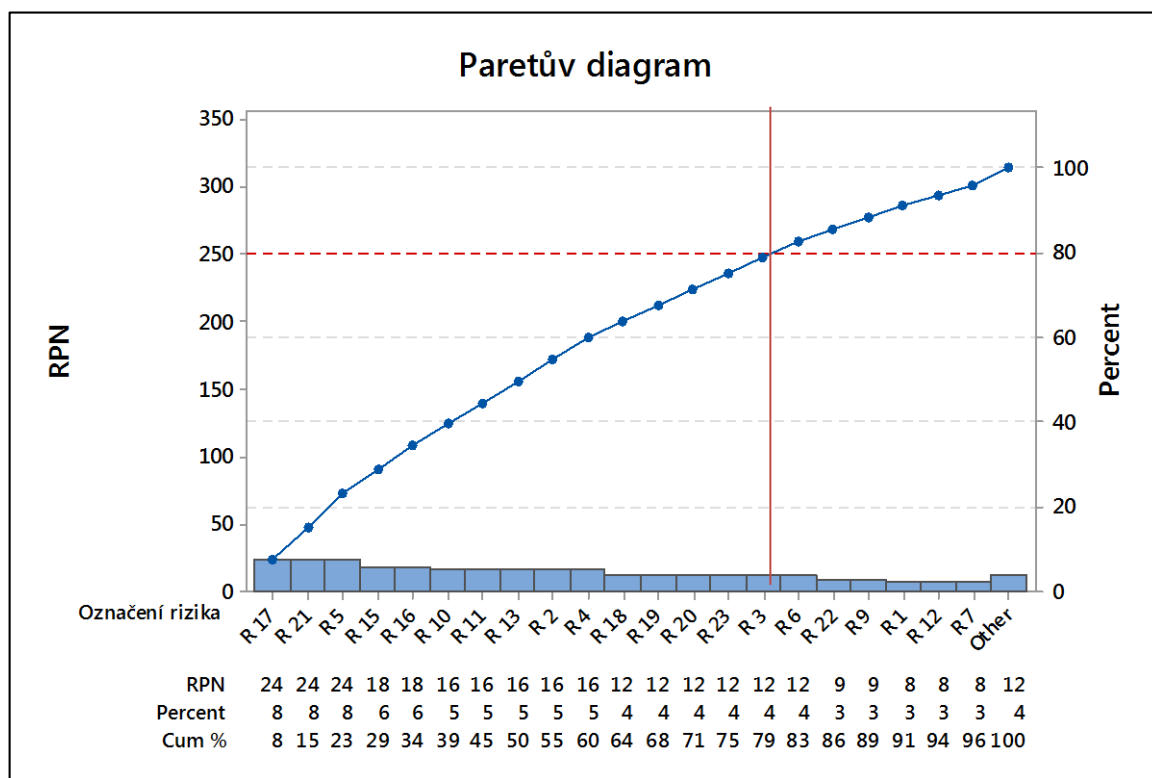
Všechny popsání rizika uvedené v Tabulce 23, které mohou nastat u zkoušení betonu, mají za následek odchylku od skutečné hodnoty. Jako nejzávažnější byla vyhodnocena tři rizika, která dosáhla hodnoty RPN 48. Jedná se o riziko s označením R 2 - Neznalost postupu zkoušení, R 4 - Neprovedení kalibrace u přístrojů a R 11 – Příliš nízká nebo vysoká teplota zrání, kde za příčinu vzniku těchto chyb může lidský faktor. Tyto rizika je možné eliminovat dodržováním daných postupů při zkoušení materiálu, kontrolou kalibrace přístrojů před měřením a dodržováním teploty zrání betonu (20°C). Celkovým součtem hodnot RPN vyšla hodnota RPN 629, která se po doporučení určitých opatření sníží na hodnotu RPN 314.

Tabulka 23 - FMEA pro proces Zkoušení betonu

PROCES	OZN. RIZIKA	POPIS RIZIKA	PŘÍČINA	NÁSLEDEK	PRAVDĚPODOBNOST VÝSKYTU	DOPAD	ODHALITELNOST	RPN	ŘEŠENÍ	PRAVDĚPODOBNOST VÝSKYTU	DOPAD	ODHALITELNOST	RPN
ZKOUŠENÍ BETONU	R 1	Špatné zacházení se vzorky	chyba lidského faktoru	odchylka od skutečné hodnoty	3	4	1	12	zvýšená opatnost při zacházení se vzorky	2	4	1	8
	R 2	Neznalost postupu		odchylka od skutečné hodnoty	3	4	4	48	dodržování daných postupů při zkoušení materiálu	1	4	4	16
	R 3	Chybné uchycení zkušebního tělesa		odchylka od skutečné hodnoty	3	4	3	36	dbát na přesné uchycení vzorku	1	4	3	12
	R 4	Neprovedení kalibrace		odchylka od skutečné hodnoty	3	4	4	48	kontrola kalibrace před měřením	1	4	4	16
	R 5	Chybné nastavení zatěžovacích mezí		odchylka od skutečné hodnoty	3	4	3	36	dbát na správnost nastavení	2	4	3	24
	R 6	Nedodržení doby uložení z. t.		odchylka od skutečné hodnoty	3	4	3	36	dodržování dané doby uložení	1	4	3	12
	R 7	Špatné odformování		odchylka od skutečné hodnoty	3	4	1	12	před nalitím b. s. formu promazat, zvýšená opatnost při odformování vzorků	2	4	1	8
	R 8	Nepřesné umístění v lisu		odchylka od skutečné hodnoty	2	3	2	12	dbát na správnost umístění z. t.	1	3	2	6
	R 9	Nepřesné umístění sond		odchylka od skutečné hodnoty	3	3	3	27	dbát na správnost umístění sond	1	3	3	9
	R 10	Špatné zakoncování		odchylka od skutečné hodnoty	3	4	2	24	zvýšená opatnost při zakoncování z. t.	2	4	2	16
	R 11	Příliš nízká nebo vysoká teplota zrání		odchylka od skutečné hodnoty	3	4	4	48	dodržování teploty zrání 20°C	1	4	4	16
	R 12	Poškození z. t.	chyba materiálu	odchylka od skutečné hodnoty	3	4	1	12	dodržování tech. postupů při ošetřování materiálu	2	4	1	8
	R 13	Vnitřní poruchy		odchylka od skutečné hodnoty	2	4	4	32	dbát na správné ošetřování a zhutnění materiálu	1	4	4	16
	R 14	Nerovnoměrnost z. t.		odchylka od skutečné hodnoty	2	3	2	12	kontrola forem, správné zhutnění	1	3	2	6
	R 15	Rovnoběžnost zatěžovacích ploch		odchylka od skutečné hodnoty	3	3	3	27	kontrola forem, správné zhutnění	2	3	3	18
	R 16	Kolmost stěn		odchylka od skutečné hodnoty	3	3	3	27	kontrola forem, správné zhutnění	2	3	3	18
	R 17	Vada siloměru	chyba přístroje	odchylka od skutečné hodnoty	3	4	3	36	průběžná kontrola siloměru	2	4	3	24
	R 18	Vada snímačů deformací		odchylka od skutečné hodnoty	2	4	3	24	průběžná kontrola snímačů	1	4	3	12
	R 19	Chyba SW		odchylka od skutečné hodnoty	3	3	2	18	průběžná aktualizace SW	2	3	2	12
	R 20	Vadný kloub		odchylka od skutečné hodnoty	2	4	3	24	průběžná kontrola kloubu	1	4	3	12
	R 21	Porucha UZ přístroje		odchylka od skutečné hodnoty	3	3	4	36	průběžná kontrola přístroje	2	3	4	24
	R 22	Vada oscilátoru		odchylka od skutečné hodnoty	2	3	3	18	průběžná kontrola oscilátoru	1	3	3	9
	R 23	Výběr metody	chyba metody	odchylka od skutečné hodnoty	2	4	3	24	dbát na správný výběr metody	1	4	3	12
							Σ RPN	629					
											Σ RPN		314

3.4.3 Paretův diagram

V diagramu (viz Obrázek 24) jsou jednotlivá rizika seřazena od největších hodnot RPN (po určitém ošetření), které byly vypočteny pomocí metody FMEA (viz Tabulka 22). Svislá červená čára protínající Lorencovu křivku (kumulativní četnost) značí v levé části diagramu 80 % důsledků. Z diagramu je vidět, že rizika spojená se zkoušením betonu jsou především: R 17 – Vada siloměru, R 21 – Porucha UZ přístroje, R 5 – Chybné nastavení zatěžovacích mezí, R 15 – Rovnoběžnost zatěžovacích ploch, R 16 – Kolmost stěn, R 10 – Špatné zakoncování, R 11 – Příliš nízká nebo vysoká teplota zrání, R 13 – Vnitřní poruchy, R 2 – Neznalost postupu, R 4 – Neprovedení kalibrace, R 18 – Vada snímačů deformací, R 19 – Chyba SW, R 20 – Vadný kloub, R 23 – Výběr metody a R 3 – Chybné uchycení zkušebního tělesa.



Obrázek 29 - Paretův diagram pro proces zkoušení betonu

4 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala ověřením fyzikálně mechanických vlastností ztvrdlého betonu a jejich porovnáním se standardy pro navrhování betonových konstrukcí uvedené v ČSN EN 1992-1-1 [8]. Jednalo se o praktické ověření pevností a modulů pružnosti betonu v tlaku na zkušebních tělesech. Na základě zkoušek betonu byla pomocí vybraných nástrojů provedena analýza rizik.

Hlavním tématem diplomové práce je problematika spojená s modulem pružnosti betonu, který ve velké míře nedosahuje požadovaných hodnot. Při navrhování betonových konstrukcí jsou velmi často automaticky používány směrné hodnoty modulu pružnosti vyjádřené z pevnosti v tlaku. Je velmi důležité si uvědomit, že modul pružnosti je základní charakteristikou zásadně ovlivňující statické chování betonových konstrukcí. Tento fakt však současné normy opomíjejí a neuvažují s určitou variabilitou modulu pružnosti v rámci jedné pevnostní třídy. Tato variabilita je způsobena především vstupem základních složek betonu - zejména kamenivem. Norma [8] uvádí v tabulce 3.1 hodnoty modulu pružnosti E_{cm} se silikátovým kamenivem. Pokud však je použito vápencové nebo pískovcové kamenivo hodnota modulu pružnosti se sníží až o 30 %, zatímco při použití čedičového kameniva se má hodnota navýšit až o 20 %. Stejně jako kamenivo, tak i cement, vodní součinitel, příměsi a přísady patří mezi vlivy technologické. Další skupinu, která významně ovlivní výslednou hodnotu modulu pružnosti, tvoří vlivy zkušební. Aby se tyto nedostatky neprojevovaly na reálné konstrukci, je nezbytná komunikace mezi dodavatelem (technologem) a objednavatelem (projektantem).

Výsledkem práce bylo stanovení pevnosti betonu v tlaku a modulů pružnosti betonu v tlaku na konstrukčním betonu. Vedle modulů statických byly stanoveny také moduly dynamické měřené ultrazvukovou a rezonanční metodou. Posuzovaly se čtyři návrhy ztvrdlého betonu, které se lišily především vodním součinitelem. Výsledky naměřených hodnot statických modulů pružnosti byly na základě pevnostních tříd porovnány se směrnými hodnotami uvedenými v normě pro navrhování betonových konstrukcí [8]. Porovnání se standardy potvrdilo teorii, že je nemožné vycházet z obecného předpokladu, aby pro jednu pevnostní třídu betonu byl stanoven vždy shodný modul pružnosti. Reálně naměřené výsledky se od směrných hodnot značně lišily, a to zejména u receptury 0/1 s pevnostní třídou 25/30, kde reálná hodnota se od hodnoty směrné odchýlila až o 22,5 %. Vzniklý rozptyl hodnot,

mezi naměřenými a směrnými moduly pružnosti, má podstatný vliv na výsledný průhyb konstrukce. Do jaké míry může vzniklý rozptyl ovlivnit konstrukci ve skutečnosti je ukázán na příkladu namodelovaném v pravděpodobnostním programu FReET. Největší pravděpodobnost poruchy $p_f = 15,942 \%$ byla naměřena na nosníku s modulem pružnosti $E_{c,s} I = 24\,500 \text{ MPa}$. Dále bylo na konstrukčních betonech provedeno stanovení hodnot dynamických modulů pružnosti, které dle předpokladu dosahovaly vyšších hodnot než u modulů statických. Největší rozdíl byl naměřen u receptury 0/3, kde hodnota dynamického modulu pružnosti měřená ultrazvukem E_{bu} byla vyšší o $7\,100 \text{ MPa}$. Dynamické moduly ve směru podélném a příčném měřeny rezonanční metodou vykázaly, oproti E_{bu} , jen o trochu nižší hodnoty, zatímco hodnota dynamického modulu ve smyku dosáhla u receptury R pouze $11\,600 \text{ MPa}$. Výsledky práce ukazují, že pevnost betonu a pochopitelně i modul pružnosti betonu závisí na vodním součiniteli.

Součástí práce bylo také vyhodnocení rizik spojené se zkoušením betonu. Pro tuto problematiku byly vybrány tři metody – nástroj FMEA (analýza důsledků a způsobů poruch), Ishikawův diagram (analýza příčin a důsledků) a Paretův diagram. Příčiny jednotlivých rizik jsou buď osoby, materiál, přístroje nebo použité metody. Důsledek je u této problematiky jednoznačný, a to vznik odchýlení od skutečné hodnoty. U metody FMEA, v Tabulce 23, jsou u každého rizika doporučena určitá opatření, jak vzniku těchto rizik předcházet. Mezi další důležité aspekty, které ovlivňují výslednou hodnotu modulu pružnosti, patří vlivy technologické – složení čerstvého betonu, technologie výroby a zpracování čerstvého betonu a kvalita tranzitní zóny. Vzhledem k rozsahu problematiky se studiem technologických vlivů práce nezabývala, avšak z mého pohledu bych doporučovala provést analýzu rizik i na toto téma.

5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ADÁMEK, J.; NOVOTNÝ, B.; KOUKAL, J. *Stavební materiály*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1997. 205 s. ISBN 80-214-0631-3.
- [2] BÍLČÍK, J.; FILLKO, L'; BENKO, V.; HALVONIK, J. *Betónové konštrukcie: Navrhovanie podl'a STN EN 1992-1-1*. 2. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU v Bratislave, 2008. 374 s. ISBN 978-80-227-2940-6.
- [3] ČSN EN 12390-1 *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. ČNI 2001.
- [4] ČSN EN 206-1:2001/Z3. *Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: ČNI 2008.
- [5] COLLEPARDI, M., *Moderní beton*, Informační centrum ČKAIT, Praha 2009, ISBN 978-80-87093-75-7.
- [6] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: ČNI 2009.
- [7] ČSN EN 12390-1. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [8] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: *Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby*. ČNI 2004.
- [9] ADÁMEK, J. a kolektiv, *Studijní opora pro kombinované studium - Modul BI01 – M03 Stavební látky*. Brno, 2004. 49 s.
- [10] *Modul pružnosti*. [Online]. Dostupné z webu: <http://www.ebeton.cz/pojmy/modul-pruznosti>.
- [11] ČSN EN 12390-13 *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku*. ČNI 2014.
- [12] ANTON, O., kolektiv autorů. *Základy zkušebnictví: Návod do cvičení*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 61 s. ISBN 80-214-2079-0.
- [13] ČSN ISO 6784 *Beton. Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. ČNI 1993.
- [14] KOCÁB, D.; MISÁK P.; CIKRLÉ P.; KOMÁRKOVÁ T.; MORAVCOVÁ B.: *Statický modul pružnosti betonu v tlaku dle ČSN ISO 6784 vs. ČSN EN 12390 – 13*, Beton TSK 3/2014.
- [15] ČSN 73 1371 (731371) *Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*, ČNI 2011.

- [16] CIKRLE, P.; KOCÁB, D.; POSPÍCHAL, O. *Zkoušení betonu ultrazvukovou impulsovou metodou*, Beton TSK 3/2013.
- [17] ČSN 73 1372 (731372) *Nedestruktivní zkoušení betonu - Rezonanční metoda zkoušení betonu*, ČNI 2012.
- [18] VESELÍ, J., *Zkoušky modulu pružnosti betonu*. Diplomová práce, vedoucí práce: Ing. Hana Hanzlová, CSc., ČVUT v Praze, 2012.
- [19] 10. Konference Technologie betonu, ČBS Servis, Pardubice 2012.
- [20] TOPCU, B.; UGURLU, A. *Elasticity Theory of Concrete and Prediction of Static E-Modulus for Dam Concrete Using Composite*. [Online]. 2007. Dostupný z webu: <http://www.docstoc.com/docs/2220202/Elasticity-Theory-of-Concrete-and-Prediction-of-Static-E-Modulus>.
- [21] JANÍČEK, P., MAREK, J., a kolektiv: *Expertní inženýrství v systémovém pojetí*. Vydavatelství Grada Publishing, a.s., 2013.
- [22] TICHÝ, M.: *Ovládání rizika. Analýza a management*. 1. vydání. Praha: C. H. Beck, 2006.
- [23] ROZSYPAL, A. *Inženýrské stavby - řízení rizik*. Bratislavské nakladatelství JAGA GROUP, s.r.o., 2008, ISBN 978-80-8076-066-3.
- [24] ČSN EN 31010. *Management rizik – Techniky posuzování rizik*. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [25] Paretův diagram. [Online]. Dostupné z webu: <http://office.lasakovi.com/excel/grafy/paretuv-diagram-graf/>.
- [26] TEPLÝ, B.; NOVÁK, D. *Spolehlivost stavebních konstrukcí: teorie, numerické metody, navrhování, software*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1998.
- [27] NOVÁK, D. *Spolehlivost konstrukcí. Studijní opora - modul P01*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007.
- [28] NOVÁK, D., RUSINA, R., VOŘECHOVSKÝ, M.: *Small-sample statistical analysis – software FREET, 9th International conference on applications of statistics and probability in civil engineering (ICASP9)*, Berkeley, California, USA, 2003.
- [29] PUKL, R.: *Moderní metodika pro stanovení bezpečnosti a spolehlivosti betonových konstrukcí*, Beton TSK 4/2008.
- [30] ČSN EN 196. *Metody zkoušení cementu*. Praha: ČNI, 2005.
- [31] ČSN EN 933. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva*. Praha: ČNI, 2012.

- [32] ČSN EN 1008. *Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu*. Praha: ČNI, 2003.

6 SEZNAMY

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Pevnostní třídy obyčejného a těžkého betonu v tlaku dle ČSN EN 206-1/Z3 [4] ...</i>	<i>10</i>
<i>Tabulka 2- Pevnostní a deformační charakteristiky betonu dle ČSN EN 1992-1-1 [8].....</i>	<i>22</i>
<i>Tabulka 3 - Složky receptur.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 4 - Výsledky těles zkoušených na pevnost v tlaku receptury R po 340 dnech</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 5 - Výsledky těles zkoušených na pevnost v tlaku receptury 0/1 po 292 dnech.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 6 - Výsledky těles zkoušených na pevnost v tlaku receptury 0/2 po 260 dnech.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 7 - Výsledky těles zkoušených na pevnost v tlaku receptury 0/3 po 197 dnech.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 8 - Výsledky naměřených statických modulů pružnosti receptury R</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 9 - Výsledky naměřených statických modulů pružnosti receptury 0/1</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 10 - Výsledky naměřených statických modulů pružnosti receptury 0/2</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 11 - Výsledky naměřených statických modulů pružnosti receptury 0/3</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 12 - Výsledky naměřených dynamických modulů pružnosti receptury R</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 13 - Výsledky naměřených dynamických modulů pružnosti receptury 0/1.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 14 - Výsledky naměřených dynamických modulů pružnosti receptury 0/2.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 15 - Výsledky naměřených dynamických modulů pružnosti receptury 0/3.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 16- Výsledky naměřených dynamických modulů pružnosti receptury R.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 17 - Výsledky naměřených dynamických modulů pružnosti receptury 0/1.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 18 - Výsledky naměřených dynamických modulů pružnosti receptury 0/2.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 19 - Výsledky naměřených dynamických modulů pružnosti receptury 0/3.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 20 - Porovnání směrných a naměřených modulů pružnosti betonu v tlaku</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 21 - Vstupní veličiny.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 22 - Stupnice hodnocení</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 23 - FMEA pro proces Zkoušení betonu</i>	<i>58</i>

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 – Přetvoření (ε_c) jako funkce napětí (σ_c) v tlaku [10]</i>	12
<i>Obrázek 2 - Pracovní diagram betonu [13]</i>	13
<i>Obrázek 3 – Umístění měřicího zařízení na zkušební těleso [13]</i>	14
<i>Obrázek 4 - Zatěžovací cyklus pro stanovení sečnového modulu pružnosti betonu v tlaku - Metoda B [11]</i>	15
<i>Obrázek 5 - Ukázka umístění sond na zkušební těleso. Označení B je budič a S je snímač. ...</i>	16
<i>Obrázek 6 – Příprava zkušebního tělesa pro rezonanční metodu [17]</i>	19
<i>Obrázek 7 - Faktory ovlivňující modul pružnosti betonu [20]</i>	20
<i>Obrázek 8 - Struktura inženýrství rizik [21]</i>	24
<i>Obrázek 9 - Příspěvek posuzování rizik k procesu managementu rizik [24]</i>	25
<i>Obrázek 10 - Příklad Ishikawova diagramu typu rybí kost [24]</i>	29
<i>Obrázek 11 - Příklad formulace stromu analýzy příčin a důsledků [24]</i>	29
<i>Obrázek 12 - Ukázka Paretova diagramu</i>	30
<i>Obrázek 13 - Odolnost konstrukce R a účinek zatížení E - dvě náhodné veličiny [27]</i>	31
<i>Obrázek 14 - Rezerva spolehlivosti, index spolehlivosti, pravděpodobnosti poruchy, a) rezerva nenormovaná, b) rezerva normovaná [27]</i>	33
<i>Obrázek 15 - Simulace Monte Carlo - dvourozměrný případ [28]</i>	35
<i>Obrázek 16 - Panel zadávání vstupních veličin - Stochastic model [28]</i>	36
<i>Obrázek 17 – Vývojový diagram jednotlivých etap metodiky práce</i>	37
<i>Obrázek 18 - Ukázka měření pevnosti betonu v tlaku na zařízení FORM TEST</i>	39
<i>Obrázek 19 - Ukázka měření statického modulu pružnosti</i>	40
<i>Obrázek 20 - Ukázka měřicího UZ zařízení (přístroj TICO) pro stanovení dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku</i>	40
<i>Obrázek 21 - Přístrojové vybavení pro měření dynamického modulu pružnosti rezonanční metodou</i>	41
<i>Obrázek 22 - Vzorkování veličin</i>	53
<i>Obrázek 23 - Vztah pro výpočet průhybu prostého nosníku se silou působící vprostřed pole</i>	53
<i>Obrázek 24 - Zadávání rovnic</i>	54
<i>Obrázek 25 - Pravděpodobnost poruchy s E_{cm} 1</i>	55
<i>Obrázek 26 - Pravděpodobnost poruchy s $E_{c,s}$ 1</i>	55
<i>Obrázek 27 - Citlivostní analýza nosníku s $E_{c,s}$ 1</i>	55
<i>Obrázek 28 - Ishikawův diagram aplikován na proces zkoušení betonu</i>	56

<i>Obrázek 29 - Paretův diagram pro proces zkoušení betonu</i>	<i>59</i>
--	-----------

SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1- Průměrné válcové pevnosti v tlaku měřené na zkušebních tělesech.....</i>	<i>43</i>
<i>Graf 2 - Průměrné statické moduly pružnosti v tlaku měřené na zkušebních tělesech</i>	<i>45</i>
<i>Graf 3 - Průměrné dynamické moduly pružnosti měřené na zkušebních tělesech UZ impulsivní metodou</i>	<i>47</i>
<i>Graf 4 - Průměrné dynamické moduly pružnosti E_{crL}, E_{crf}, a G_{cr} měřené na zkušebních tělesech rezonanční metodou</i>	<i>49</i>
<i>Graf 5 - Porovnání statického modulu pružnosti betonu v tlaku $E_{c,s}$ naměřeném na zkušebních tělesech R-0/3 vs. Směrná hodnota modulu pružnosti E_{cm} dle ČSN EN 1992-1-1 [8]</i>	<i>50</i>
<i>Graf 6 – Porovnání modulu pružnosti a pevnosti betonu v tlaku.....</i>	<i>51</i>
<i>Graf 7 - Vliv vodního součinitele w na moduly pružnosti $E_{c,s}$, E_{bu}, E_{crL}, E_{crf}, G_{cr}.....</i>	<i>51</i>